

# **CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA E SEDIMENTAR DO ESTUÁRIO DO RIO MINHO**

**ANTÓNIO LUÍS SANTOS ARRISCADO PALHARES DELGADO**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA, RECURSOS HÍDRICOS  
E AMBIENTE**

---

Orientador: Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto

SETEMBRO DE 2011

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2010/2011**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2010/2011 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.





## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de deixar o meu reconhecimento a todos os que me auxiliaram na realização desta dissertação, pela sua disponibilidade, dedicação e compreensão, fundamentais para o trabalho conseguido, bem como àqueles que acompanharam e ajudaram a minha formação académica.

Ao Prof. Doutor Francisco Taveira Pinto, orientador da Dissertação, pela enorme disponibilidade, paciência e atenção fornecidas, além dos conhecimentos transmitidos durante todo o desenvolvimento do trabalho.

À Eng<sup>a</sup>. Raquel Silva, pelo apoio e atenção prestadas no esclarecimento de dúvidas relativamente à modelação.

À D. Paula Isabel Pinto e à D. Esmeralda Miguel, do IHRH, pelo apoio efectuado na realização deste trabalho.



## RESUMO

Os estuários são ambientes únicos, localizados na fronteira entre a terra e o mar e entre a água doce e a água salgada. O ecossistema estuarino é extremamente sensível e contém habitats muito importantes para a biodiversidade, a produção de biomassa e a preservação de inúmeras espécies oceânicas e terrestres. Mais recentemente, os estuários têm tido um incremento vigoroso na sua ocupação antrópica, devido as novas exigências de conforto, recreio e lazer, sendo igualmente procurados pela nova indústria, o turismo. Por outro lado, a intensa ocupação do litoral, frequentemente em áreas de grande sensibilidade, tem originado desequilíbrio na dinâmica dos processo costeiros, criando problemas de segurança nas populações e destruição dos seus bens.

Não é pois de estranhar que o crescente interesse científico despertado, recentemente, pelo litoral e, por acréscimo, pelas zonas estuarinas se deva não só à importância económica da sua diversidade de recursos mas, igualmente, à busca de soluções para tentar resolver problemas criados por uma ocupação não ordenada. São, pois, necessários estudos que revelem soluções para o futuro com o intuito de gerir correctamente as áreas costeiras de modo a que as próximas gerações delas possam usufruir.

Sendo assim, a evolução do estuário do rio Minho, sujeita a desequilíbrios vários, suscitou o desenvolvimento de uma metodologia de trabalho com o propósito de aumentar o conhecimento sobre este ambiente costeiro do país.

Numa primeira fase do estudo, efectuou-se a recolha de informação de base relativa às características do estuário e às diversas intervenções humanas na bacia hidrográfica e no estuário do rio Minho, constituindo, por tanto, uma parte fundamental do trabalho para a compreensão e enquadramento do caso em estudo. Posteriormente foi feita uma modelação computacional do estuário através do *software* TELEMAC, tendo como base uma compilação de dados da batimetria cedidos pelo INAG, desde a embocadura até sensivelmente 2 km a montante de Vila Nova de Cerveira.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estuário do rio Minho, hidrodinâmica, morfodinâmica, modelação, TELEMAC.



## **ABSTRACT**

Estuaries are unique environments situated between the sea and the land and between freshwater and saltwater. The estuarine ecosystem is extremely sensitive and contains very important habitats for biodiversity, the biomass production and the preservation of many oceanic and terrestrial species. More recently, the estuaries have suffered a strong increase in its human occupation, in response to new demands for comfort, recreation and leisure being also sought for by the new industry, tourism. On the other hand this intense occupation of the coast, often in areas of great sensitivity, has led to unbalance in the dynamics of coastal processes, originating security problems for populations and the destruction of their property.

It is therefore not surprising that the growing scientific interest aroused recently by the coast and, by extension, the estuaries is due not only to the economic importance of its diversity of resources but also to finding solutions to tackle problems created by a disorganised occupation. There is therefore a need for studies that come up with solutions for the future in order to properly manage coastal areas so that future generations can enjoy them. Thus, the evolution of the estuary of the river Minho, subject to various unbalances, led to a development a working methodology in order to increase knowledge about this country's coastal environment.

In the first phase of the study, basic information was collected, regarding the characteristics of the estuary and the various human interventions in the watershed and the estuary of the River Minho. Being, therefore, a vital part for the understanding and framing of the case study. Later a computer modelling with TELEMAC software was made based on a compilation of bathymetry data provided by INAG, from the mouth of the estuary to Vila Nova de Cerveira.

**KEYWORDS:** Minho river estuary, hydrodynamic, morphodynamic, modelling, TELEMAC.



**ÍNDICE GERAL**

**AGRADECIMENTOS** ..... i

**RESUMO** ..... iii

**ABSTRACT** ..... v

**INTRODUÇÃO** ..... 1

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA..... 1

1.2. OBJECTIVOS E METODOLOGIA..... 2

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO..... 2

**2. HIDRODINÂMICA E MORFODINÂMICA DOS ESTUÁRIOS** 3

2.1. ESTUÁRIOS ..... 3

2.1.1 Definição..... 3

2.1.2 Classificação Geomorfológica dos Estuários ..... 6

2.1.3 Desenvolvimento Morfodinâmico dos Estuários ..... 7

2.2. A MARÉ EM ÁGUAS POUCO PROFUNDAS..... 11

2.3. PROCESSO DE MISTURA DA ÁGUA DOCE COM A ÁGUA SALGADA ..... 12

2.3.1 Classificação de Acordo com a Variação da Salinidade..... 13

2.3.2 Classificação de Acordo com o Critério Proposto por Pritchard (1967)..... 15

2.4. TRANSPORTE SEDIMENTAR..... 15

2.4.1 Origem e Transporte dos Sedimentos até aos Estuários ..... 15

2.4.2 Os Sedimentos nos Estuários ..... 18

2.4.2.1 Alteração do balanço sedimentar nos estuários ..... 19

**3. CASO DE ESTUDO: ESTUÁRIO DO RIO MINHO** ..... 23

3.1. O RIO MINHO ..... 23

3.2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO ESTUÁRIO DO RIO MINHO ..... 25

3.2.1 Limites do Estuário ..... 25

3.2.2 Caudais ..... 25

3.2.3 Batimetria ..... 26

3.2.4 Marés..... 28

3.2.5 Agitação Marítima..... 30

3.2.6 Correntes..... 31

3.2.7 Salinidade/Temperatura ..... 33

3.3. DINÂMICA SEDIMENTAR ..... 33

3.3.1 Granulometria dos sedimentos ..... 34

3.3.2 Evolução morfológica ..... 36

3.3.2.1 Extracção de Inertes..... 37

3.3.2.2	Dragagens .....	37
3.3.2.3	Evolução Morfosedimentar .....	40
3.4.	APROVEITAMENTOS HIDRÁULICOS .....	44
3.4.1	Aproveitamentos existentes.....	44
3.4.2	Alteração do Regime Fluvial.....	45
3.4.3	Retenção de Sedimentos em Albufeiras .....	46

## **4. APLICAÇÃO DO MODELO .....51**

4.1.	DESCRIÇÃO GERAL DO SOFTWARE.....	51
4.1.1	As Principais Aplicações do Sistema Telemac.....	52
4.1.2	Estrutura do Sistema .....	53
4.1.3	Módulos Utilizados na Simulação do Estuário do Rio Minho .....	54
4.2.	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO .....	55
4.3.	CRIAÇÃO DO MODELO.....	57
4.3.1	Domínio e passo Temporal.....	58
4.3.2	Atrito de Fundo .....	58
4.3.3	Forças de Maré.....	58
4.3.4	Caudal.....	58
4.4.	VALIDAÇÃO DO MODELO .....	59
4.5.	RESULTADOS .....	65
4.6.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	66
4.6.1	Campos de velocidades .....	66
4.6.2	Superfície livre .....	67
4.6.3	Transporte de sedimentos .....	68

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....71**

5.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
5.2.	RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS .....	73
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	75
	BIBLIOGRAFIA REFERIDA .....	78

## **ANEXOS.....71**

## ÍNDICE FIGURAS

Fig.2.1 – Representação esquemática das definições de estuário de acordo com Pritchard (1967), Dalrymple <i>et al.</i> (1992), Kjerfve (1987) e Fairbrige (1980) (adaptado de Frazão (2003)).	5
Fig.2.2 – Tipos fisiográficos de estuários (Fairbridge, 1980, retirado de Miranda <i>et al.</i> , 2002).	7
Fig.2.3 – Domínio relativo do rio, das ondas e da maré e a sua relação com a morfologia dos estuários (Dalrymple <i>et al.</i> , 1992; Cooper, 1993, retirado de Woodroffe, 2003).	7
Fig.2.4 – Classificação das formações costeiras no contexto da influência do rio, das ondas e da maré, relativo à tendência: a) transgressivo, ou b) regressivo do litoral (Body <i>et al.</i> , 1992, retirado de Woodroffe, 2003).	8
Fig.2.5 – Morfologia de um estuário típico de uma zona <i>macrotidal</i> : (a) A influência relativa do rio e do meio ambiente marinho, e (b) a morfologia característica (Woodroffe 2003).	9
Fig.2.6 – Reconhecimento das zonas de um estuário influenciado pelas ondas: (a) A influência relativa do rio e do meio ambiente marinho, e (b) a morfologia característica (Woodroffe (2003)).	10
Fig.2.7 – Mistura entre água salgada, mais densa, e a água doce, menos densa (Oberrecht, sem data(a)).	13
Fig.2.8 – a) Estuário em Cunha Salina; b) Estuário Altamente Estratificado (Tomczak (1996)).	14
Fig.2.9 – a) Estuário Parcialmente Misturado; b) Estuário Verticalmente Homogéneo (Tomczak (1996)).	14
Fig.2.10 – Movimento de massa (Lencastre e Franco (2006), retirado de Lameiro (2009)).	16
Fig.2.11 – Movimento das partículas.	17
Fig.2.12 – Perfil longitudinal dos sedimentos depositados ao longo de um rio (Oberrecht, sem data(b)).	17
Fig.2.13 – Padrão típico de deposição do sedimentos nas albufeiras (Lameiro, 2009).	19
Fig.2.14 – Balanço de sedimentos numa albufeira, (Batuca e Jordaan (2000) retirado de Lameiro (2009)).	20
Fig.3.1 – Representação da parte espanhola da bacia hidrográfica do rio Minho (Confederación Hidrográfica del Miño-Sil (a)).	24
Fig.3.2 – Representação da parte portuguesa da bacia hidrográfica do rio Minho (Instituto da Água, 2000).	24
Fig.3.3 – Evolução do escoamento anual na estação hidrométrica de Foz do Mouro (Instituto da Água, 2000).	26
Fig.3.4 – Levantamento topo-hidrográfico de estuário do rio Minho efectuado pelo Instituto Hidrográfico (Reis, 2008).	27

Fig.3.5 – Altura de maré para os marégrafos de pressão e sensores de pressão dos RCM9 em Setembro de 2005 (Zacarias, 2007).....	28
Fig.3.6 – Altura de maré para os marégrafos de pressão e sensores de pressão dos RCM9 em Março de 2006 (Zacarias, 2007). .....	29
Fig.3.7 - Frequência da direcção das ondas registadas na bóia do cabo Sillero e na bóia de Leixões (Puertos del Estado e Gomes, 2006).....	31
Fig.3.8 – Classificação dos sedimentos segundo o esquema proposto por Folk (1974) (Balsinha <i>et al.</i> , 2009). .....	34
Fig.3.9 – Distribuição sedimentar ao longo do estuário do Minho (Balsinha <i>et al.</i> , 2009). ....	35
Fig.3.10 – Localização das dragagens no canal e no acesso ao cais de Caminha (imagem do earth.google.com complementada com informação do LNEC, 2007).....	38
Fig.3.11 – Evolução do perfil transversal do canal de navegação do <i>ferry-boat</i> antes do início das dragagens (LNEC, 2007).....	38
Fig.3.12 – Evolução do perfil transversal do canal de navegação do <i>ferry-boat</i> após o início das dragagens (LNEC, 2007).....	39
Fig.3.13 – Fotografias aéreas da embocadura do rio Minho entre 1958 e 2010 (Instituto Geográfico do Exército e Instituto Geográfico Português de LNEC, 2007 e www.earth.google.com). .....	43
Fig.3.14 – Perfil longitudinal dos aproveitamentos no rio Minho (Yordi <i>et al.</i> , 1967).....	44
e algumas das suas características (LNEC, 2007) (Confederación Hidrográfica del Miño-Sil (b)).....	44
Fig.3.15 – Evolução da capacidade de armazenamento em barragens construídas na parte espanhola da bacia hidrográfica do rio Minho (LNEC, 2007, retirado de CHN, 1998). .....	45
Fig.3.16 – Relação entre o volume de sedimentos depositados e a área da bacia hidrográfica para a província de Ourense. ....	47
Fig.4.1 – Exemplo da malha de um rio e de um dique (Mensencal, sem data).....	52
Fig.4.2 – Estrutura utilizada na construção do modelo. A cinzento encontram-se identificados os módulos do sistema TELEMAC.....	56
Fig.4.3 – Representação da batimetria modelada. ....	57
Fig.4.4 –Caudal característico diário para os períodos das duas campanhas (Zacarias, 2007). .....	58
Fig.4.5 –Caudal fluvial medido na estação hidrométrica 01G/03 de Foz do Mouro (Zacarias, 2007). .....	59
Fig.4.6 – Zonas de referência utilizadas para a verificação do modelo. ....	60
Fig.4.7 – Propagação da maré viva de 20 de Setembro de 1990. Comparação entre valores observados (Consulmar, 1990) e valores calculados com batimetrias de 1982-86 e de 2006 (LNEC, 2007b) com a batimetria de 2006 calculado com o sistema TELEMAC: a) Camarido; b) Seixas; c) V. N. de Cerveira.....	61

Fig.4.8 – Propagação da maré morta de 27 de Setembro de 1990. Comparação entre valores observados (Consulmar, 1990) e valores calculados com batimetrias de 1982-86 e de 2006 (LNEC, 2007b) com a batimetria de 2006 calculado com o sistema TELEMAC: a) Camarido; b) Seixas; c) V. N. de Cerveira. ....	62
Fig.4.9 – Propagação da maré viva de 20 de Setembro de 1990. Comparação entre Camarido, Seixas e V. N. de Cerveira: a) Cálculo com o <i>software</i> TELEMAC; b) Dados; c) Cálculo com batimetria de 1982-86, pelo LNEC; d) Cálculo com batimetria de 2006, pelo LNEC. ....	63
Fig.4.10 – Capacidade de transporte de sedimentos não-coesivos em maré viva para um caudal de 100 m <sup>3</sup> /s. Comparação entre a simulação efectuada com o TELEMAC e a do LNEC (2007b).....	64
Fig.1 – Propagação da maré viva em Setembro de 2005: a) imposta na fronteira marítima; b) Camarido; c) Seixas; d) V. N. de Cerveira. ....	82
Fig.2 – Superfície livre na enchente – 514800 segundos.....	83
Fig.3 – Campo de velocidades na enchente – 514800 segundos. ....	84
Fig.4 – Superfície livre no final da enchente – 526080 segundos.....	85
Fig.5 – Campo de velocidades no final da enchente – 526080 segundos.....	86
Fig.6 – Superfície livre na vazante – 541200 segundos.....	87
Fig.7 – Campo de velocidades na vazante – 541200 segundos. ....	88
Fig.8 – Superfície livre no final da vazante – 550800 segundos.....	89
Fig.9 – Campo de velocidades no final da vazante – 550800 segundos.....	90
Fig.10 – Transporte de sedimentos na enchente – 515280 segundos. ....	91
Fig.11 – Pormenor do transporte de sedimentos na embocadura durante a enchente – 515280 segundos. ....	92
Fig.12 – Transporte de sedimentos na vazante – 530400 vazante .....	93
Fig.13 – Pormenor do transporte de sedimentos na embocadura durante a vazante – 530400 segundos.....	94
Fig.14 – Propagação da maré morta em Setembro de 2005: a) imposta na fronteira marítima; b) Camarido; c) Seixas; d) V. N. de Cerveira.....	95
Fig.15 – Superfície livre na enchente – 516000 segundos.....	96
Fig.16 – Campo de velocidades na enchente – 516000 segundos. ....	97
Fig.17 – Superfície livre no final da enchente – 524400 segundos.....	98
Fig.18 – Campo de velocidades no final da enchente – 524400 segundos.....	99
Fig.19 – Superfície livre na vazante – 536400 segundos.....	100
Fig.20 – Campo de velocidades em vazante – 536400 segundos.....	101
Fig.21 – Superfície livre no final da vazante – 551040 segundos.....	102
Fig.22 – Campo de velocidades no final da vazante – 551040 segundos.....	103

Fig.23 – Transporte de sedimentos na enchente – 516240 segundos. ....	104
Fig.24 – Transporte de sedimentos na vazante – 535680 segundos.....	105
Fig.25 - Pormenor do transporte de sedimentos na embocadura durante a vazante – 535680 segundos. ....	106
Fig.26 – Propagação da maré viva em Fevereiro de 2006: a) imposta na fronteira marítima; b) Camarido; c) Seixas; d) V. N. de Cerveira. ....	107
Fig.27 – Superfície livre na enchente – 516000 segundos.....	108
Fig.28 – Campos de velocidades na enchente – 516000 segundos.....	109
Fig.29 – Superfície livre no final da enchente – 525800 segundos.....	110
Fig.30 – Campo de velocidades no final da enchente – 525800 segundos.....	111
Fig.31 – Superfície livre na vazante – 544080 segundos. ....	112
Fig.32 – Campo de velocidades na vazante – 544080 segundos.....	113
Fig.33 – Superfície livre no final da vazante – 554880 segundos.....	114
Fig.34 – Campo de velocidades no final da vazante – 554880 segundos. ....	115
Fig.35 – Transporte de sedimentos na enchente – 517680 segundos. ....	116
Fig.36 - Pormenor do transporte de sedimentos durante a enchente na: a) entrada; b) embocadura, do estuário – 517680 segundos. ....	117
Fig.37 – Transporte de sedimentos na vazante – 543600 segundos.....	118
Fig.38 – Pormenor do transporte de sedimentos na embocadura durante a vazante – 543600 segundos. ....	119
Fig.39 – Propagação da maré morta em Fevereiro de 2006: a) imposta na fronteira marítima; b) Camarido; c) Seixas; d) V. N. de Cerveira. ....	120
Fig.40 – Superfície livre na enchente – 511000 segundos.....	121
Fig.41 – Campo de velocidades na enchente – 511000 segundos. ....	122
Fig.42 – Superfície livre no final da enchente – 521760 segundos.....	123
Fig.43 – Campo de velocidades no final da enchente – 521760 segundos. ....	124
Fig.44 – Superfície livre na vazante – 537120 segundos. ....	125
Fig.45 – Campo de velocidades na vazante – 537120 segundos.....	126
Fig.46 – Superfície livre no final da vazante – 553920 segundos.....	127
Fig.47 – Campo de velocidades no final da vazante – 553920 segundos. ....	128
Fig.48 – Transporte de sedimentos na enchente – 511920 segundos. ....	129
Fig.49 - Pormenor do transporte de sedimentos durante a enchente na entrada do modelo – 511920 segundos. ....	130
Fig.50 – Transporte de sedimentos na vazante – 536640 segundos.....	131

Fig.51 - Pormenor do transporte de sedimentos na embocadura durante a vazante – 536640 segundos.....	132
Fig.52 – Propagação da maré viva em Setembro de 2005: a) imposta na fronteira marítima; b) Camarido; c) Seixas; d) V. N. de Cerveira. ....	133
Fig.53 – Superfície livre na enchente – 518640 segundos.....	134
Fig.54 – Campo de velocidades na enchente – 518640 segundos. ....	135
Fig.55 – Superfície livre no final da enchente – 526080 segundos.....	136
Fig.56 – Campo de velocidades no final da enchente – 526080 segundos.....	137
Fig.57 – Superfície livre na vazante – 541200 segundos.....	138
Fig.58 – Campos de velocidades na vazante – 541200 segundos.....	139
Fig.59 – Superfície livre no final da vazante – 550800 segundos.....	140
Fig.60 – Campo de velocidades no final da vazante – 550800 segundos. ....	141
Fig.61 – Transporte de sedimentos na enchente – 515280 segundos. ....	142
Fig.62 – Pormenor do transporte de sedimentos na embocadura durante a enchente - 515280 segundos. ....	143
Fig.63 – Transporte de sedimentos na vazante – 530400 segundos. ....	144
Fig.64 – Pormenor do transporte de sedimentos na embocadura durante a vazante - 530400 segundos.....	145
Fig.65 – Propagação da maré morta em Setembro de 2005: a) imposta na fronteira marítima; b) Camarido; c) Seixas; d) V. N. de Cerveira.....	146
Fig.66 – Superfície livre na enchente – 516000 segundos.....	147
Fig.67 – Campo de velocidades na enchente – 516000 segundos. ....	148
Fig.68– Superfície livre no final da enchente – 524400 segundos.....	149
Fig.69 – Campos de velocidades no final da enchente – 524400 segundos. ....	150
Fig.70 – Superfície livre na vazante – 536400 segundos.....	151
Fig.71 – Campos de velocidades na vazante – 536400 segundos.....	152
Fig.72 – Superfície livre no final da vazante – 549360 segundos.....	153
Fig.73 – Campos de velocidades no final da vazante – 549360 segundos. ....	154
Fig.74 – Transporte de sedimentos na enchente – 515760 segundos. ....	155
Fig.75 – Transporte de sedimentos na vazante – 536160 segundos. ....	156
Fig.76 – Pormenor do transporte de sedimentos na embocadura durante a vazante - 536160 segundos.....	157
Fig.77 – Propagação da maré viva em Janeiro de 2007: a) imposta na fronteira marítima; b) Camarido; c) Seixas; d) V. N. de Cerveira. ....	158
Fig.78 – Superfície livre na enchente – 518640 segundos.....	159

Fig.79 – Campo de velocidades na enchente – 518640 segundos. ....	160
Fig.80 – Superfície livre na vazante – 544800 segundos. ....	161
Fig.81 – Campos de velocidades na vazante – 544800 segundos. ....	162
Fig.82 – Transporte de sedimentos na enchente – 524400 segundos. ....	163
Fig.83 – Pormenor do transporte de sedimentos durante a enchente na: a) ilha da Boega; b) embocadura do estuário - 524400 segundos. ....	164
Fig.84 – Transporte de sedimentos na vazante – 541920 segundos.....	165
Fig.85 – Pormenor do transporte de sedimentos na embocadura durante a vazante – 541920 segundos. ....	166
Fig.86 – Propagação da maré morta em Janeiro de 2007: a) imposta na fronteira marítima; b) Camarido; c) Seixas; d) V. N. de Cerveira. ....	167
Fig.87 – Superfície livre na enchente – 510720 segundos. ....	168
Fig.88 – Campos de velocidades na enchente – 510720 segundos.....	169
Fig.89 – Superfície livre na vazante – 538800 segundos. ....	170
Fig.90 – Campos de velocidades na vazante – 538800 segundos. ....	171
Fig.91 – Transporte de sedimentos na enchente – 512160 segundos. ....	172
Fig.92 – Pormenor do transporte de sedimentos durante a enchente na: a) ilha da Boega; b) embocadura do estuário – 512160 segundos. ....	173
Fig.93 – Transporte de sedimentos na vazante – 537120 segundos.....	174
Fig.94 – Pormenor do transporte de sedimentos durante a vazante na: a) ilha da Boega; b) embocadura do estuário – 537120 segundos. ....	175

## ÍNDICE QUADROS

Tabela 3.1 – Caudais de cheia no rio Minho (Instituto da Água, 2000). .....	26
Tabela 3.2 – Elementos de maré em Caminha e na costa portuguesa (LNEC, 2007). .....	30
Tabela 3.3 – Elementos de maré na costa espanhola referidos ao ZH adoptados na costa portuguesa (LNEC, 2007). .....	30
Tabela 3.4 – Observações de correntes de maré em águas vivas (AV) e águas mortas (AM) (LNEC, 2007). .....	32
Tabela 3.5 – Observações de correntes de maré com equipamentos fixos (LNEC, 2007). ..	32
Tabela 3.6 – Composição granulométrica dos sedimentos do fundo (Balsinha <i>et al.</i> , 2009)	34
Tabela 3.7 – Composição granulométrica dos sedimentos do fundo (CEDEX, 2004 retirado de LNEC, 2007). .....	35
Tabela 3.8 – Diâmetro característico dos sedimentos (fracção >0,062 mm) na secção Caminha-Pasaxe (CEDEX, 2004 retirado de LNEC, 2007). .....	36
Tabela 3.9 – Comparação de levantamentos do sector médio do estuário: volume de erosão e de sedimentação entre 1986 e 2006 e também entre 1986 e 2004 após ajuste do nível de referência do levantamento de 2004 em 0,93m (adaptado de LNEC, 2007). .....	41
Tabela 3.10 – Comparação de levantamentos do sector inferior do estuário: volumes de erosão e de sedimentação (LNEC, 2007). .....	41
Tabela 3.11 – Comparação de levantamentos da zona exterior: volumes de erosão e de sedimentação (LNEC, 2007). .....	42
Tabela 3.12 – Principais barragens da bacia hidrográfica do Minho (Confederación Hidrográfica del Miño-Sil, 2007) .....	45
Tabela 3.13 – Características das albufeiras analisadas ( <a href="http://sig.marm.es/snczi/visor.html?herramienta=Presas">http://sig.marm.es/snczi/visor.html?herramienta=Presas</a> ). .....	48
Tabela 3.14 – Comparação do resultado da estimativa com o resultados apresentados por Lameiro (2009) (Informação das áreas retirado do sítio da Associação Portuguesa de Recursos Hídricos). .....	49
Tabela 4.1 – Níveis de maré (m) em maré viva, observados (Consulmar, 1990) e calculados com batimetrias de 1982-86 e de 2006 (LNEC, 2007b) e com a batimetria de 2006 recorrendo ao sistema TELEMAT .....	61
Tabela 4.2 – Níveis de maré (m) em Maré morta, observados (Consulmar, 1990) e calculados com batimetria de 1982-86 e de 2006 (LNEC, 2007b) e com a batimetria de 2006 recorrendo ao sistema TELEMAT .....	62
Tabela 4.3 – Comparação de correntes de maré em marés vivas (MV) e marés mortas (MM) entre os valores facultados na tabela 3.4 do capítulo 3 com os valores calculados. ....	66
Tabela 4.4 – Valores máximos de velocidade e de transporte de sedimentos na embocadura, nas oito simulações efectuadas. ....	69
Tabela 1 – Instantes em que foram apresentados resultados para a superfície livre, campos de velocidade e transporte de sedimentos. ....	82

Tabela 5.2 – Instantes em que foram apresentados resultados para a superfície livre, campos de velocidade e transporte de sedimentos.....	95
Tabela 3 – Instantes em que foram apresentados resultados para a superfície livre, campo de velocidades e transporte de sedimentos. ....	107
Tabela 4 – Instantes em que foram apresentados resultados para a superfície livre, campo de velocidades e transporte de sedimentos. ....	120
Tabela 5 – Instantes em que foram apresentados resultados para a superfície livre, campo de velocidades e transporte de sedimentos. ....	133
Tabela 6 – Instantes em que foram apresentados resultados para a superfície livre, campos de velocidades e transporte de sedimentos. ....	146
Tabela 7 – Instantes em que foram apresentados resultados para a superfície livre, campo de velocidades e transporte de sedimentos. ....	158
Tabela 8 – Instantes em que foram apresentados resultados para a superfície livre, campo de velocidades e transporte de sedimentos. ....	167

**SÍMBOLOS E ABREVIATURAS**

ZR – Zona de Maré do Rio

ZM – Zona de Mistura

ZC – Zona Costeira

ECOIS – Contribuições Estuarinas para a Dinâmica da Plataforma Interna

INAG – Instituto da Água

ZH – Zero Hidrográfico

PM<sub>máx</sub> – Preia-Mar Máxima

PMAV – Preia-Mar de Águas Vivas

PMAM – Preia-Mar de Águas Mortas

NM – Nível Médio

BMAM – Baixa-Mar de Águas Mortas

BMAV – Baixa-Mar de Águas Vivas

AV – Águas Vivas

AM – Águas Mortas

NMM – Nível Médio do Mar

LNHE – Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement

IAHR – International Association for Hydro-Environment Engineering and Reseacher

EDF – Electricité de France



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

Além do interesse científico, os estuários têm uma importância histórica fundamental para o desenvolvimento da humanidade. Cerca de 60% das grandes cidades distribuídas ao redor da Terra estão localizadas nas proximidades dos estuários, representando em proporção às suas dimensões uma das mais valiosas regiões de nosso planeta (Miranda *et al.*, 2002).

São, vulgarmente, conhecidos como áreas de transição, onde a água doce se mistura com a água salgada. Do ponto de vista ecológico e biológico, a importância dos estuários traduz-se pela sua alta diversidade, constituindo um local de maternidade para inúmeras espécies. Exercem um papel importante no equilíbrio do meio ambiente por proporcionarem condições para a manutenção das suas teias tróficas. Os produtores primários dos estuários, contribuem significativamente para a vida nos mares e oceanos e, portanto, desempenham um papel ecológico fundamental na manutenção destes ecossistemas. A importância económica dos estuários resulta no fornecimento de alimentos para o homem e animais, além de servirem como lugar de navegação, comércio, descanso e lazer.

Os estuários são ambientes sedimentares costeiros cuja evolução depende da interacção entre parâmetros geomorfológicos, sedimentares e hidrodinâmicos, sendo a actividade biológica uma condicionante fundamental na manutenção do sistema. Também se destacam entre os principais ambientes deposicionais costeiros da história geológica recente, possuindo uma diversidade de morfologias devido às diferentes formas de interacção dos fluxos de energia gerados pelas ondas, marés e descarga fluvial (Miranda *et al.*, 2002).

Estes ambientes costeiros podem ser caracterizados pela sua morfologia e padrão de estratificação. Vários factores físicos, tais como, o caudal escoado pelo rio, as correntes e alturas de maré, a composição dos sedimentos, a agitação marítima e o vento, contribuem para a complexidade destes ambientes costeiros. A interacção do caudal dos rios, correntes de maré e a morfologia da bacia produz o tipo de circulação e estratificação de um determinado estuário, afectando a composição e distribuição da flora e fauna locais, Mao *et al.*, 2004, referidos por Reis, 2008.

Como consequência dos avanços tecnológicos, a informática despontou como uma ferramenta importante para a modelação hidráulica, hidrológica e da engenharia ambiental, contribuindo para uma melhor gestão dos sistemas aquáticos. Trata-se, portanto de um campo de estudo multidisciplinar que trata de temas ambientais, sociais e tecnológicos, dentro de uma perspectiva ética, usando tecnologia de informação no sentido amplo, a fim de proporcionar uma gestão mais eficiente de recursos hídricos e ambientais do território de influência, ajudando também a solucionar problemas emergentes. Nos dias que correm são poucos os projectos que podem ser executados sem um suporte destas tecnologias.

## **1.2. OBJECTIVOS E METODOLOGIA**

Após uma vasta pesquisa bibliográfica pretendeu-se, fundamentalmente, apresentar uma síntese da informação dispersa disponível e considerada relevante em relação ao estuário do rio Minho. Como complemento foi feita uma modelação do estuário recorrendo ao software TELEMAC. Para a realização da simulação foi necessário recorrer a uma batimetria do estuário em estudo, facultada pelo Instituto da Água, e referente ao ano de 2006.

Através da simulação de vários caudais e com diferentes amplitudes de maré pretende-se aprofundar o conhecimento das correntes e as suas velocidades como também o transporte de sedimentos no estuário do rio Minho. Deste modo, pretende-se que este trabalho seja uma mais valia e um contributo do conhecimento das características hidrodinâmicas e sedimentares do estuário do rio Minho.

## **1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta Dissertação está organizada em seis capítulos onde se descrevem as diferentes fases que constituíram todo o trabalho desenvolvido.

No primeiro capítulo – “Introdução” – para além de se efectuar um enquadramento do objecto de estudo, de forma a contextualizar e salientar a importância dos estuários, são enunciados os objectivos da Dissertação e metodologia associada ao seu desenvolvimento.

No segundo capítulo – “Hidrodinâmica e Morfodinâmica dos Estuários” – é efectuada uma caracterização geral dos estuários, nomeadamente são descritos os processos sedimentares e hidrodinâmicos desenvolvidos nos estuários, como também se referem algumas definições destes sistemas costeiros.

No terceiro capítulo – “Caso de Estudo: Estuário do Rio Minho” – é realizada uma descrição das características do rio Minho e da sua bacia hidrográfica, com maior destaque para o do estuário. Como complemento também foi feita uma estimativa relativamente ao volume de sedimentos depositados nas albufeiras da bacia hidrográfica do rio Minho.

O quarto capítulo – “Aplicação do Modelo” – contempla a descrição geral do funcionamento do *software* TELEMAC e das suas ferramentas auxiliares. Neste capítulo também se realiza a validação do modelo e são apresentados os resultados obtidos e a discussão dos mesmos.

No quinto e último capítulo da Dissertação – “Considerações Finais” – é efectuada uma síntese do trabalho desenvolvido, são apresentadas as principais conclusões da Dissertação e, de acordo com as limitações do trabalho, propõem-se tarefas a realizar no futuro.

# 2

## HIDRODINÂMICA E MORFODINÂMICA DOS ESTUÁRIOS

### 2.1. ESTUÁRIOS

Em geral as zonas costeiras têm um elevado valor económico, social e ecológico, pelo que os estuários se podem também incluir nesse conjunto. Tradicionalmente, funcionam como pólos de atracção para a actividade humana e, nas suas margens, desenvolvem-se algumas das maiores áreas metropolitanas do mundo (Cardoso da Silva, 2000).

Pensa-se que estes ambientes naturais, onde a drenagem continental se mistura com o mar, tiveram início há cerca de 6500 anos, quando o aquecimento do globo provocou a subida média da água do mar, em cerca de 150 m, até ao seu nível actual (Hume *et al.*, 2003). Desde então, os estuários têm sido locais privilegiados, onde ocorrem fenómenos de erosão e deposição de sedimentos que provocam constantemente a mudança da sua forma e por outro lado influenciam a dinâmica sedimentar do litoral, Alves (1996), citado por Sousa (2003).

#### 2.1.1 DEFINIÇÃO

O termo estuário representa, em geral, a região terminal de um rio, quando este desagua no mar. No entanto, a definição de estuário e da delimitação da respectiva área têm sido abordadas por numerosos autores, variando os conceitos que estão subjacentes às respectivas definições.

Para os oceanógrafos, engenheiros, geógrafos e ecologistas, o termo estuário é utilizado para indicar a região interior de um ambiente costeiro, onde ocorre o encontro de águas fluviais com a do mar transportada pelas correntes da maré e pelas ondas. Alguns pesquisadores também incluem a região da plataforma continental adjacente, que recebe a chamada pluma estuarina, como parte integrante do sistema estuarino (Miranda *et al.*, 2002).

Uma das definições mais conhecidas deve-se a Pritchard (1967), considerando a salinidade da água como critério delimitador: “*Estuário é um corpo de água costeiro semifechado, com uma livre ligação com o oceano aberto, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce, oriunda da drenagem continental*”. Esta definição reconhece que a circulação dentro do estuário é influenciada significativamente por limites laterais, que o estuário é uma zona costeira que não é grande o suficientemente para formar uma linha de costa, mas sim fazer parte dela. A comunicação com o oceano tem que ser ampla o suficiente para permitir o livre e interrupto fluxo de maré e diluição da água salgada e que existam gradientes de densidade. Entretanto, esta definição de estuário torna-se limitada por não reconhecer a variabilidade temporal da descarga fluvial e as possíveis alterações

morfológicas que ocorrem na grande maioria das embocaduras estuarinas. Por exemplo, um estuário durante uma longa estação seca pode apresentar salinidades oceânicas ao longo de toda a sua extensão; por outro lado pode também tornar-se completamente doce durante a estação das chuvas. O mesmo problema ocorre se a embocadura é fechada ocasionalmente, comum em costas de restinga com transporte de sedimentos significativo.

Com o aprofundamento dos estudos acerca dos estuários, têm surgido novas definições e critérios de classificação, com base na morfologia, características sedimentares e hidrodinâmicas, tornando os estuários estruturas complexas, dependendo quase sempre do ponto de vista sob o qual estão a ser analisados.

Considerando o modelo de Pritchard (1967) irrealista, uma vez que esta definição abrange somente a região de influência da água do mar ou zona de mistura, Dionne (1963) e Fairbridge (1980) apresentam uma definição baseada essencialmente em critérios geomorfológicos dividindo o estuário em três sectores: *“Estuário é uma reentrância do mar, que atinge o vale de um rio até ao limite de influência da maré, sendo geralmente subdividido em três sectores: a) estuário inferior ou marinho, de ligação livre com o oceano aberto; b) estuário médio, sujeito à intensa mistura da água do mar com a água fluvial; c) estuário superior ou fluvial, caracterizado por água doce mas sujeito à influência diária da maré”*. Sendo assim, o estuário foi considerado como um sistema constituído pela região onde ocorre a diluição da água do mar e também a parte do rio sujeita à oscilação da maré. Os limites entre esses sectores ao longo do estuário são variáveis e dependem da intensidade da descarga fluvial, das correntes de maré e da influência do vento.

Kjerfve (1987), levando em conta a génese geológica, define os limites a jusante segundo critérios sedimentológicos e hidrodinâmicos, estendendo o limite do sistema estuarino até ao ambiente marinho costeiro em frente da pluma estuarina: *“Estuário é um ambiente costeiro que apresenta conexão restrita com o oceano adjacente. Tal conexão permanece aberta pelo menos intermitentemente. Esse ambientes podem ser subdivididos em três zonas distintas: Zona de Maré do Rio (ZR) – parte fluvial com salinidade praticamente igual a zero, mas ainda sujeita à influência da maré; Zona de Mistura (ZM) – região onde ocorre a mistura da água doce da drenagem continental com a água do mar; Zona Costeira (ZC) – região costeira adjacente que se estende até à frente da pluma estuarina que delimita a camada limite costeira”*. Comparando esta definição com as anteriores verifica-se que ZR e ZM correspondem aos sectores denominados *estuário fluvial* e *médio* para a definição de Dionne (1963) e Fairbridge (1980) ou ao *estuário* da definição de Pritchard (1967). A inclusão da ZC procura enfatizar o facto de que é essa parte da plataforma continental que está sob a influência directa da massa de água estuarina. Kjerfve (1987) destacou a importância do carácter dinâmico dos limites entre as três zonas, que pôde variar no tempo em escala de horas a até milhares de anos. Todavia, esta definição ainda é inadequada sob o ponto de vista geológico, pois pode levar a que se considere um ambiente de sedimentação fluvial como estuarino, já que processos de transporte difusivos podem carrear sais até áreas onde a sedimentação é exclusivamente fluvial (exemplo: delta). Além do mais, o prolongamento do estuário até ao largo introduz um ambiente deposicional marinho clássico dentro do limite estuarino.

Por sua vez, Dalrymple *et al.* (1992) admitem que para uma correcta definição destes sistemas ambientais é necessário considerar aspectos relacionados com o movimento sedimentar da desembocadura do estuário para montante: *“Estuário é a parte voltada para o mar de um sistema de vales inundados, o qual recebe sedimentos de fontes fluviais e marinhas, contendo fácies influenciadas pela maré, ondas e processos fluviais. Considera-se que o estuário se estende desde o limite interno das fácies de maré, até ao limite oceânico das fácies costeiras de entrada”*. A partir deste pressupostos, Dalrymple *et al.* (1992) consideram que o estuário ocuparia uma área desde a

embocadura do rio, com salinidade variando entre 30-35psu, até a parte à montante onde a salinidade da água atingisse cerca de 0.1psu. Os limites definidos por Dalrymple *et al.* (1992) apresentam variações temporais menos dramáticas, já que a migração das fácies sedimentares requer um maior espaço de tempo. Ocorre porém a necessidade da presença de uma fácies fluvial. É comum encontrarmos vales inundados com pequena bacia de drenagem e/ou localizados em áreas com pouca pluviosidade, onde os rios são intermitentes ou pouco competentes. Nestas condições a fácies fluvial torna-se pouco expressiva ou até mesmo inexistente, e o estuário pode apresentar apenas a fácies marinha (marés e ondas) no registro sedimentológico.

Como se percebe, os estuários são entidades complexas e altamente dinâmicas tornando-os difíceis de serem definidos segundo apenas um determinado critério. Por vezes, para a sua caracterização é necessário a combinação de mais de um critério com base nas suas particularidades morfológicas, sedimentológicas e hidrodinâmicas.

Estas definições foram baseadas nos trabalhos publicados por Cardoso da Silva (2000), Miranda *et al.* (2002), Frazão (2003), Sousa (2003), Souza (2004) e Universidade Federal da Bahia, o qual representam apenas algumas das já muitas existentes, reforçando a ideia da dificuldade de concordância da sua definição.

A figura 2.1 representa esquematicamente as definições descritas anteriormente.

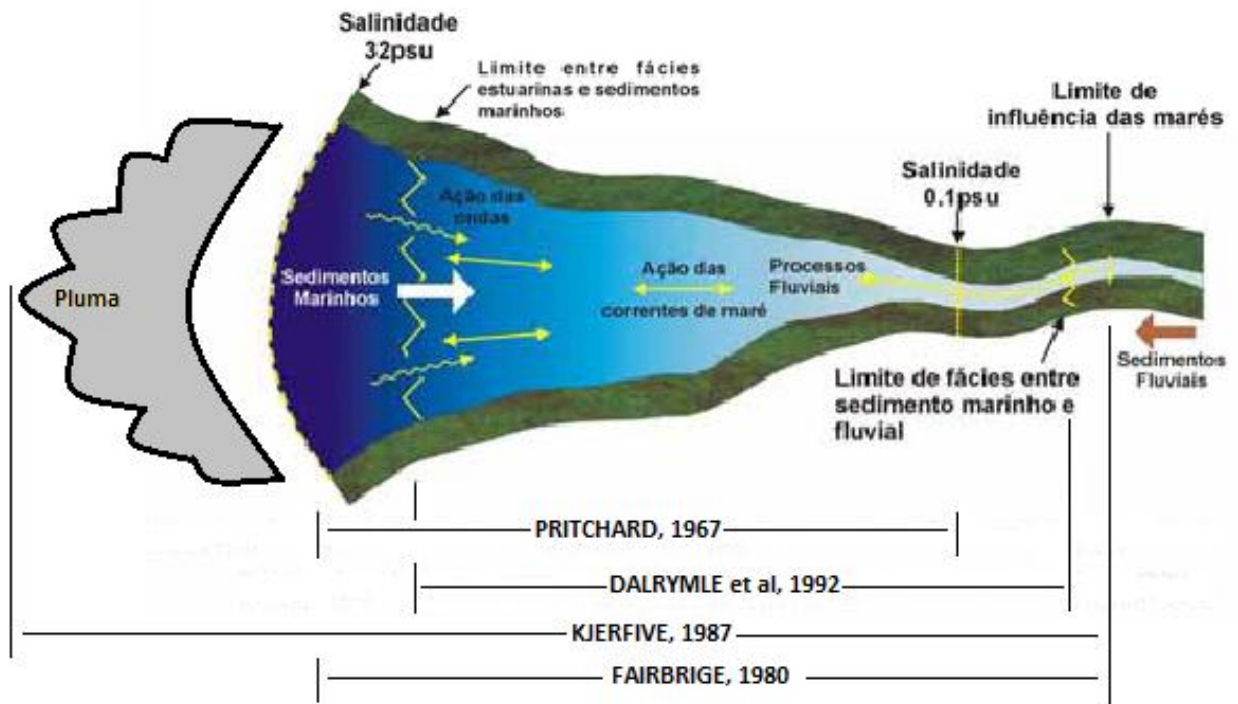


Fig.2.1 – Representação esquemática das definições de estuário de acordo com Pritchard (1967), Dalrymple *et al.* (1992), Kjerfve (1987) e Fairbrige (1980) (adaptado de Frazão (2003)).

### 2.1.2 CLASSIFICAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DOS ESTUÁRIOS

Os estuários encontram-se em redor do globo em qualquer condição climática e de maré, mas desenvolvem-se melhor nas planícies costeiras das médias latitudes, ao largo de plataformas continentais extensas que presentemente estão submergindo sob a elevação relativa do nível médio da água do mar, que teve início há uns milhares de anos, como já foi referido. Esta rapidez na elevação desse nível representou um importante papel para a formação dos estuários actuais, uma vez que a inundação dos vales dos rios ocorreu mais rapidamente do que a sedimentação que os poderia ter preenchido. Actualmente, com o aumento mais lento do nível médio da água do mar, o preenchimento dos estuários pelos sedimentos ocorre de maneira mais rápida. Logo, a existência de ambientes estuarinos é função do balanço entre as flutuações do nível do mar e o volume de sedimentos transportados pelos rios.

A classificação geomorfológica de um estuário, baseada na sua origem, foi desenvolvida por Pritchard (1952). Este autor dividiu os estuários em quatro grupos diferentes (Cardoso da Silva, 2000; Miranda *et al.*, 2002; Frazão, 2003; Zacarias, 2007):

- **Planície costeira** – estão amplamente distribuídos em redor do mundo apresentando uma forma irregular. São típicos de regiões de planície costeira e formaram-se durante a elevação Holocénica, que inundou os vales dos rios. O ritmo da inundação foi mais acentuado do que a sedimentação tornando a sua forma actual muito semelhante ao vale do rio. Estes estuários são relativamente rasos, raramente excedendo 30 m de profundidade e orientam-se perpendicularmente à linha de costa;
- **Fiorde** – formaram-se durante o Pleistoceno por acções do gelo, devido à intensa escavação glacial na planície costeira ou próxima à plataforma continental. Apresentam como características principais a elevada profundidade média (em torno das centenas de metros) e um fundo rochoso, que actua como obstáculo à troca de água entre o estuário e o mar adjacente, favorecendo o desenvolvimento de condições anóxicas nas camadas de água mais profundas. São ambientes localizados em latitude altas e comuns no Alasca, na Noruega, no Chile e na Nova Zelândia;
- **Construído por Barra** – estes estuários formaram-se durante a transgressão Flandriana. Os processos sedimentares activos formaram barras arenosas na sua entrada. São sistemas associados a regiões costeiras que podem sofrer processos erosivos com facilidade, produzindo grande quantidade de sedimentos. Estes sistemas são, em geral, rasos, com profundidades não superiores a 20-30 m, e podem apresentar canais e lagunas extensas no seu interior;
- **Os Restantes Estuários** – existem outros estuários que têm uma formação diferente e que não são abrangidos nas classificações geomorfológicas anteriores. Estes sistemas naturais são formados por outros processos, tais como: falha tectónica, erupções vulcânicas, tremores e deslizamentos de terra. Nesta categoria também se incluem estuários que sofreram grandes alterações devido a processos sedimentares, como são exemplos os deltas e rias.

A figura 2.2 apresenta esquematicamente alguns tipos estuarinos mencionados acima, de acordo com a classificação morfológica de Fairbridge (1980).

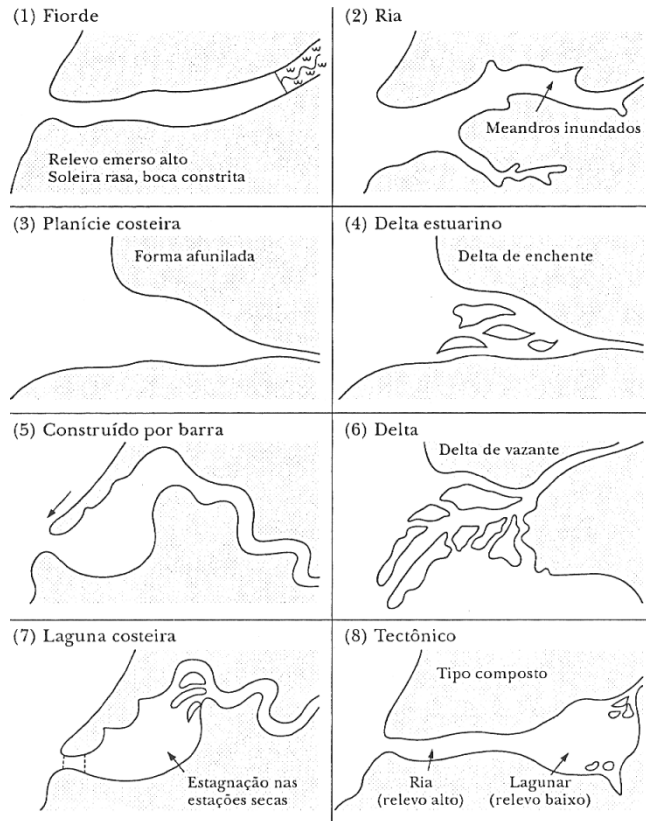


Fig.2.2 – Tipos fisiográficos de estuários (Fairbridge, 1980, retirado de Miranda *et al.*, 2002).

### 2.1.3 DESENVOLVIMENTO MORFODINÂMICO DOS ESTUÁRIOS

Sendo um ambiente de transição localizado entre o continente e o oceano, e sofrendo acções intermitentes da descarga fluvial, das ondas e da maré, os estuários apresentam diferentes morfologias que resultam de uma maior influência dos diferentes agentes naturais, figura 2.3.

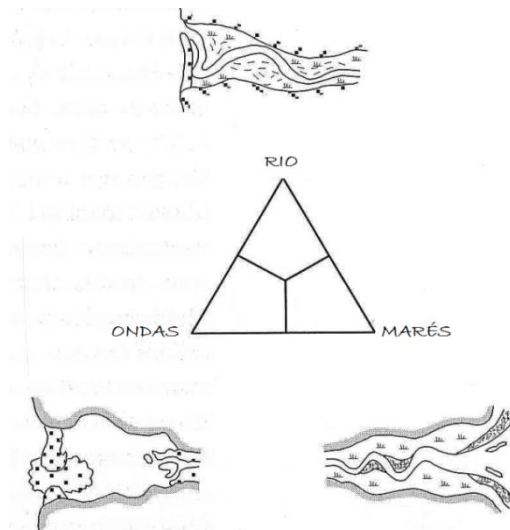


Fig.2.3 – Domínio relativo do rio, das ondas e da maré e a sua relação com a morfologia dos estuários (Dalrymple *et al.*, 1992; Cooper, 1993, retirado de Woodroffe, 2003).

A figura 2.3 representa as morfologias gerais dos estuários dominados pelos diferentes processos (caudal fluvial, ondas e marés). Este esquema é útil pois fornece um enquadramento em que cada morfologia estuarina pode ser colocada. No entanto, este conceito pode ser aplicado em várias escalas. Os estuários podem ser diferenciados em termos de domínio pelo rio, pela maré e pelas ondas, como demonstra a figura, mas mais frequentemente áreas específicas de um estuário podem ser individualmente caracterizadas como dominadas por um tipo destes processos e com graus de intensidades diferentes.

Boyd *et al.* (1992) desenvolveram um esquema de classificação da morfologia da costa num contexto evolutivo, em que é feita uma distinção entre litorais transgressivos (*transgressive*), em que a costa está a recuar em direcção à terra e litorais regressivos ou de progradação (*regressive* ou *prograding*) em que o litoral está a desenvolver-se em direcção ao mar (Woodroffe, 2003).

O transgressivo está associado a uma sequência do aumento relativo do nível médio da água do mar, porém o regressivo nem sempre é uma sequência da diminuição do nível médio da água do mar. Progradação da costa pode ocorrer onde a taxa de fornecimento de sedimentos é suficiente para permitir que o litoral avance em relação ao mar, mesmo que haja um aumento gradual do nível médio da água do mar.

A figura 2.4 esquematiza a relação entre o relativo domínio do rio, das ondas e da maré no ambiente costeiro (Boyd *et al.*, 1992). Num contexto evolutivo, em que tanto pode ocorrer transgressão ou progradação, as características ambientais morfologicas estão ligadas no tempo. Ambientes dominados pelo rio contêm deltas com canais de distribuição, limitados por acumulações arenosas, que formam a bacia receptora. Onde as marés dominam, há um progressão de deltas e de estuários dominados pela maré, frequentemente com extensas plataformas de maré. Nas margens dominadas pelas ondas, existem barreiras (corpo alongado de areia paralelo à costa) onde se incluem praias, dunas, deltas de marés, depósitos de espraiamento e cabedelos. As lagoas costeiras desenvolvem-se onde as ondas constroem barreiras em enseadas. Embora as ondas não se sobreponham por completo aos efeitos do processo dos rio e das marés, elas frequentemente desenvolvem formações características na embocadura dos rios (Woodroffe, 2003).

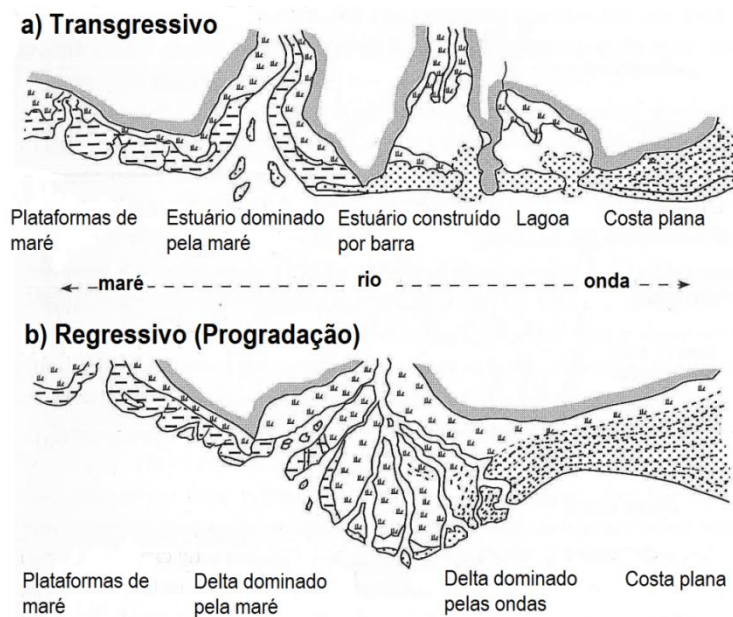
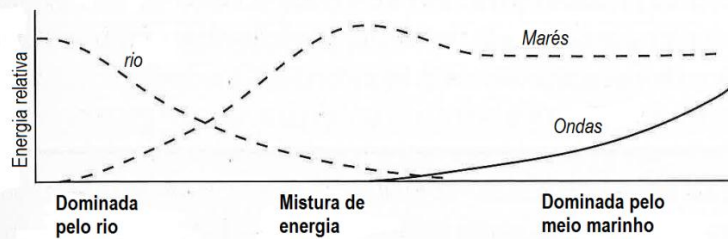


Fig.2.4 – Classificação das formações costeiras no contexto da influência do rio, das ondas e da maré, relativo à tendência: a) transgressivo, ou b) regressivo do litoral (Body *et al.*, 1992, retirado de Woodroffe, 2003).

A área de um delta, dominada pelo rio, é caracterizada por inúmeros meandros e cursos de água já existentes. A secção dominada pela maré tem uma sequência de canais com um forma afunilada e inúmeros canais de maré, enquanto que na área dominada pelas ondas a costa é composta por uma série de cumes paralelos (Woodroffe, 2003).

Estuários situados em locais de configurações macrotidais (dominados pelas marés) têm uma forma tipicamente afunilada (com uma embocadura larga que vai diminuindo em direcção a montante) principalmente quando se desenvolvem em planícies costeiras regressivas, Chappell e Woodroffe (1994), Wells (1995) referidos por Woodroffe (2003). Neste contexto, os estuários distinguem-se por terem na sua embocadura bancos de areias de forma alongada, paralelos ao fluxo, como se pode verificar na figura 2.5(b). São também estuários bem misturados (estuários verticalmente homogêneos, que será analisados em 2.3.1 com maior detalhe), resultante da forte corrente bidireccional da maré.

**a) Processos dominantes**



**b) Morfologia**

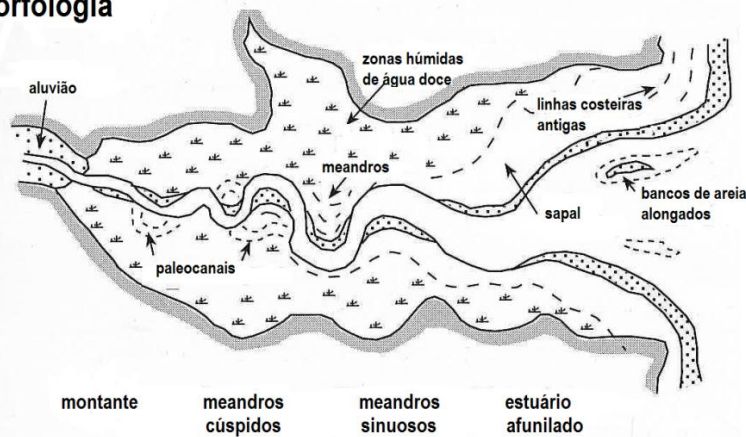


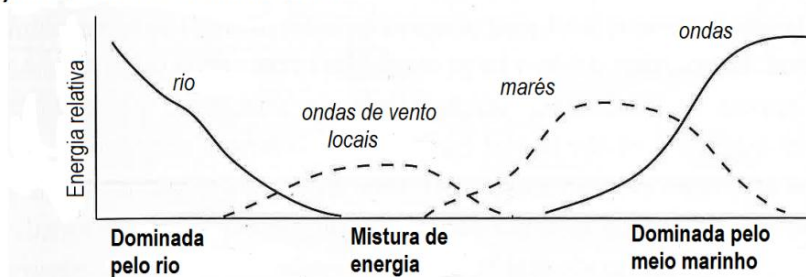
Fig.2.5 – Morfologia de um estuário típico de uma zona *macrotidal*: (a) A influência relativa do rio e do meio ambiente marinho, e (b) a morfologia característica (Woodroffe 2003).

Existem quatro zonas morfológicamente distintas que podem ser reconhecidas ao longo do curso de água nestes estuários: um sector mais a jusante em forma de funil, em seguida um segmento de meandros sinuosos, posteriormente um segmento de meandros cúspidos (interior das curvas é afiadas) e finalmente um canal a montante que se caracteriza por ser relativamente recto. Por outro lado, também se pode subdividir este tipo de estuários relativamente aos processos dominantes, figura 2.5(a), em que se traduz numa zona a montante dominada pelo rio, uma zona central marcada por mistura de energia e por fim a parte voltada para o mar que é dominada pelo meio marinho. A zona a montante tem em geral um movimento sedimentar em direcção ao mar devido ao escoamento fluvial.

A zona central é marcada por uma convergência de sedimentos influenciada quer pelo o rio quer pelos processos marinhos e o seu curso de água geralmente apresenta uma forma altamente sinuosa. A parte mais a jusante também é relativamente recta, as suas margens têm um desenvolvimento em forma de funil e os sedimentos apresentam um movimento em direcção a montante (Woodroffe, 2003).

Em zonas costeiras dominadas pelas ondas (figura 2.6), os estuários são geralmente fechados ou parcialmente fechados devido ao desenvolvimento de barreiras arenosas construídas pelas ondas. Estas barreiras arenosas são em geral eficazes em diminuir a energia das ondas quando estas penetram no estuário e também influenciam as características da salinidade no seu interior. A entrada que liga o rio ao mar pode fechar descontinuamente, assim ocorrendo uma transição gradual para uma lagoa costeira que pode estar permanentemente fechada ou intermitentemente aberta para o mar (Woodroffe, 2003).

### a) Processos dominantes



### b) Morfologia

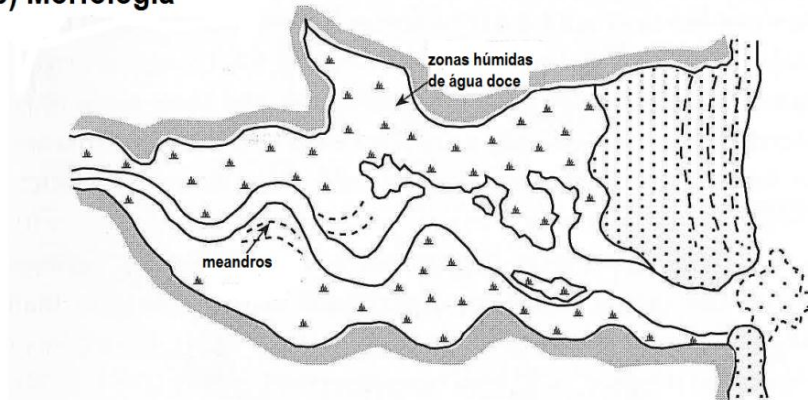


Fig.2.6 – Reconhecimento das zonas de um estuário influenciado pelas ondas: (a) A influência relativa do rio e do meio ambiente marinho, e (b) a morfologia característica (Woodroffe (2003)).

Ao longo do tempo, estes estuários sofrem uma diminuição da sua profundidade e da sua área de armazenamento de água em resposta a três processos deposicionais: entrada de areia e outros sedimentos marinhos oriundos do mar, aumento dos deltas de areia e do lodo na foz do rio e acumulação vertical de lama em toda a parte central do estuário. O tamanho e a forma destes estuários e a taxa de enchimento depende de factores geológicos passados, tais como a topografia do leito rochoso, o tipo e taxa de fornecimento de sedimentos fluviais da bacia hidrográfica, e o equilíbrio relativo da onda de maré e da descarga fluvial (Woodroffe, 2003).

À medida que este tipo de estuários vai sofrendo este processo deposicional, a complexidade das suas margens aumenta, até à fase final em que o escoamento é feito apenas por um canal, como demonstra a figura 2.6(b). Nesta fase a energia da maré é rapidamente atenuada na entrada do rio, baixa e lisa, e consequentemente só se faz sentir uma pequena amplitude na ordem dos centímetros no interior do estuário, por outro lado, a influência fluvial é sentida até à costa, mas com variações de maré no nível da água (Woodroffe, 2003). Também este género de estuários pode ser subdividido relativamente aos processos dominantes, como demonstra a figura 2.6(a).

## 2.2. A MARÉ EM ÁGUAS POUCO PROFUNDAS

A maré é um movimento periódico que se traduz na subida e descida do nível médio da superfície do mar ou oceano, devido à acção das forças de atracção gravíticas geradas, essencialmente, entre a Terra, a Lua e o Sol e às forças centrífugas associadas ao movimento de rotação da Terra.. A influência da lua é bastante superior, pois embora a sua massa seja muito menor que a do Sol, esse facto é compensado pela menor distância à Terra.

O conhecimento da maré é de especial interesse em zonas costeiras, nomeadamente nos estuários; o seu estudo apresenta grande importância para o estabelecimento da navegabilidade, para a análise da propagação da cunha salina, para estudos ambientais e mais recentemente para a análise do potencial energético das correntes de maré. No entanto, são estudos de grande complexidade, variando naturalmente conforme o local, a morfologia, a corrente do rio e a ondulação incidente (Abreu, 2010).

A maré astronómica é distorcida da sua forma originalmente sinusoidal, ao propagar-se em direcção à costa. Factores tais como a diminuição da profundidade do largo para a costa, o próprio recorte de linha de costa, a complexidade da batimetria e os modos próprios de oscilação da bacia, fazem com que a maré sofra alterações durante a sua propagação. No entanto, apesar das características fundamentais da maré serem semelhantes, esta tem um comportamento particular em cada região do globo, porque depende fortemente das características do local para onde a onda se propaga (Reis, 2008).

As marés em oceano aberto têm geralmente uma menor amplitude do que próximo da costa. Este aumento de amplitude deve-se em parte à amplificação por reflexão e ressonância das ondas, mas resulta essencialmente da propagação em águas cada vez menos profundas. Como resultado, a velocidade de propagação da onda diminui, tal como o comprimento de onda, mas por outro lado a altura da maré aumenta, assim como a velocidade da corrente de maré. Se adicionalmente, a maré se propagar para o interior de um estuário em que a largura diminui em direcção a montante, a onda é comprimida lateralmente, provocando o aumento da altura de água (Forrester, 1983).

Esta distorção da maré resulta da interacção não linear da maré e do estuário. Matematicamente esta mudança pode ser traduzida num crescimento das constituintes compostas e harmónicas das principais constituintes astronómicas (Speer, 1991). Estas contribuições não lineares ocorrem como resposta a águas pouco profundas e não existem no oceano (Tomczak, 1996-2000).

Assim que a maré penetra num rio, esta deixa de ser dominada pelas forças da maré, mesmo que a sua energia seja elevada acabando por ser amortecida devido ao atrito com o fundo e às descargas fluviais (Godin, 1999). Contudo, são geradas características típicas da maré em estuários, as quais foram já observadas por diversos autores:

- O atrito resulta num amortecimento maior em águas pouco profundas, abrandando a propagação das variações do nível da água em torno da baixa-mar relativamente à preia-mar (Dronkers, 1986). Portanto, na maioria dos casos, as velocidades nas enchentes são maiores e como consequência com períodos de tempo menores em relação às vazantes;

- No interior do estuário a velocidade de propagação da crista da onda é superior à da cava, provocando a distorção da onda. Esta distorção é tanto maior quanto maior for o quociente entre a amplitude e a profundidade (Zacarias, 2007).
- O empolamento e o estreitamento do estuário abrandam o progresso da onda para montante, aumentando a sua amplitude e a sua distorção (Tomczak, 1996-2000);
- Um amortecimento da maré devido à vazão fluvial, com menores amplitudes em períodos de cheias que na estiagem e também uma redução na sua celeridade ou aumento da fase. Em alguns casos, este amortecimento não é tão evidente, porque as marés são amplificadas em certos estuários e dissipadas noutros, tendo que levar em conta as características da geometria do canal, como a largura e a profundidade (Gallo, 2004);
- Uma sobrelevação do nível médio da água do rio, gerada pela dissipação de energia da onda dá origem a um fluxo de quantidade de movimento e a um aumento do gradiente de pressão (Gallo, 2004);
- Oscilação de níveis de longo período (entre 15 e 28 dias) que deslocam o nível médio, devidas às não linearidades e que geralmente excedem a maré no local no estuário superior (Gallo, 2004).

### 2.3. PROCESSO DE MISTURA DA ÁGUA DOCE COM A ÁGUA SALGADA

O efeito de descarga fluvial, constantemente adicionada pelo rio, além de gerar uma componente de circulação que naturalmente se desloca de montante para jusante, ao diluir água do mar produz diferenças de densidade ao longo do estuário, gerando movimentos para jusante forçados pelo gradiente de pressão. A interação das várias propriedades e processos: descarga do rio, correntes de maré, gradiente de pressão, advecção/difusão turbulenta; produz, dentro da delimitação geomorfológica da bacia estuarina, a distribuição da salinidade que é característica de cada estuário, Officer (1983) mencionado por Miranda *et al.* (2002).

No estuário, a água doce move-se persistentemente na superfície em direção ao oceano, como mostra a figura 2.7, pois a sua densidade é menor do que a da água do mar, a qual contém por volta de 35 gramas por litro de sais dissolvidos os são maioritariamente cloreto de sódio e cloreto de magnésio. Portanto, a água salgada é mais pesada que a água doce quando as duas têm temperaturas idênticas (Oberrecht(a)). No seu movimento para jusante, a água doce arrasta elementos de água do mar para a camada superficial e a salinidade aumenta com a profundidade e em direção ao mar. Essa transferência de água da camada inferior para a superior é unidirecional e o fenómeno denomina-se por entranhamento. Porém a mistura das duas águas pode ser causada também por fenómenos de difusão turbulenta e advecção (Miranda *et al.*, 2002).

Em geral, quando a descarga do rio é mais intensa, o entranhamento é o mecanismo predominante e quanto maior for a amplitude da maré, maior será a sua influência para gerar difusão turbulenta e conseqüentemente mistura (Miranda *et al.*, 2002). Isto revela que a maré tem uma grande influência na forma como se faz a mistura. O vento é considerado menos importante, mas em todo o caso pode ser uma força principal quando a amplitude de maré é pequena, e tem uma maior influência em estuários rasos, especialmente aqueles com uma área muito vasta. O vento pode criar ondas internas contribuindo para o processo de mistura.

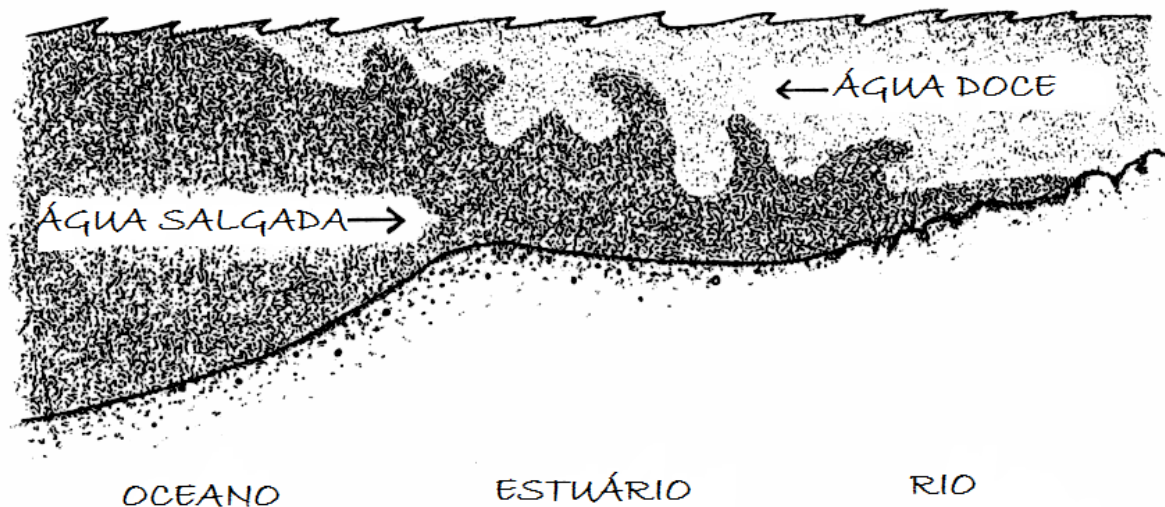


Fig.2.7 – Mistura entre água salgada, mais densa, e a água doce, menos densa (Oberrecht, sem data(a)).

O processo de mistura não é simples nem uniforme. As marés, os ventos, as ondas e o escoamento fluvial variam e diferem nos seus efeitos de estação para estação e até mesmo de dia para dia. Por exemplo, o ciclo mensal da maré morta e da maré viva pode alterar significativamente as características de um estuário onde as marés são a principal força de mistura. Durante as marés vivas, quando a amplitude da maré é maior, as correntes de maré aumentam e podem acelerar o processo de mistura; por outro lado, durante as marés mortas, a amplitude da maré é menor e podem ter pouco efeito sobre a mistura, resultando na estratificação dos estuários (Oberrecht, sem data(a)).

### 2.3.1 CLASSIFICAÇÃO DE ACORDO COM A VARIAÇÃO DA SALINIDADE

Independentemente da classificação geomorfológica, cada estuário apresenta diferentes padrões de circulação, estratificação da salinidade e processos de mistura. O esquema de classificação de acordo com a salinidade permite agrupar os estuários em diferentes tipos onde estabelece qualitativamente as principais características da zona de mistura. A transição entre os diversos tipos depende da descarga do rio, da amplitude da maré, do componente baroclínico de velocidade e de características geométricas como a razão largura/profundidade (Miranda *et al.*, 2002). Sendo assim, temos os seguintes tipos de estuários:

- **Cunha Salina** – caracterizam-se por ter grandes descargas fluviais comparativamente com a influência da maré, sendo portanto dominados pelo rio. Como está representado na figura 2.8a) a água doce flutua sobre a água densa oceânica, e esta penetra em forma de cunha pelo estuário dentro (Tomczak, 1996). Sofrem um processo de mistura lento e com um crescimento gradual ao longo do estuário, com o máximo da salinidade na sua embocadura e caracterizado por uma intensa turbulência (Miranda *et al.*, 2002);
- **Altamente Misturado** – neste género de estuários há um aumento da influência da maré em relação ao caudal fluvial. A água doce ao movimentar-se no estuário em direcção à foz (na camada superior) intercepta a forte maré criando grande pressão na zona de contacto das duas camadas. Cria-se instabilidade a qual se manifesta por ondas internas que acabam por rebentar, injectando água salgada para a camada superior. Como mostra a figura 2.8b), a salinidade na camada superior

aumenta na direção do mar e a salinidade da camada inferior é idêntica à da água do mar (Tomczak, 1996);

- **Parcialmente Misturado** – resulta de um aumento adicional da ação da maré no interior do estuário. Como consequência da forte maré, cria-se turbulência em todo o estuário e, conseqüentemente, verifica-se a mistura de água entre as duas camadas quer na direção ascendente quer na descendente. Como ilustra a figura 2.9a) a salinidade cresce gradualmente desde a superfície até ao fundo do rio; o mesmo comportamento progressivo existe horizontalmente em direção ao mar (Tomczak, 1996);
- **Verticalmente Homogêneo** – este tipo de estuários apresentam um desequilíbrio ainda maior entre o volume de água do mar e a descarga fluvial. Em condições naturais estes estuários apresentam, em geral, pequena estratificação vertical de salinidade, o fluxo vertical de sal é desprezível e o processo de mistura ocorre principalmente na direção longitudinal, Dyer (1973) citado por Miranda *et al.* (2002). O processo de penetração da salinidade para o interior do estuário é conseguido inteiramente por difusão turbulenta. Não é possível fazer-se a distinção entre a camada superior e inferior (Tomczak, 1996). A ilustração 2.9b) demonstra este tipo de estuário.

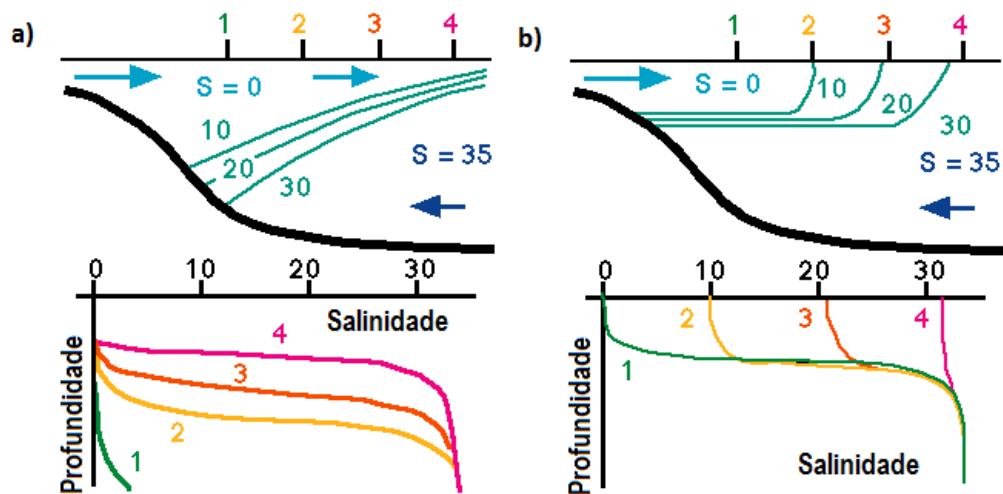


Fig.2.8 – a) Estuário em Cunha Salina; b) Estuário Altamente Estratificado (Tomczak (1996)).

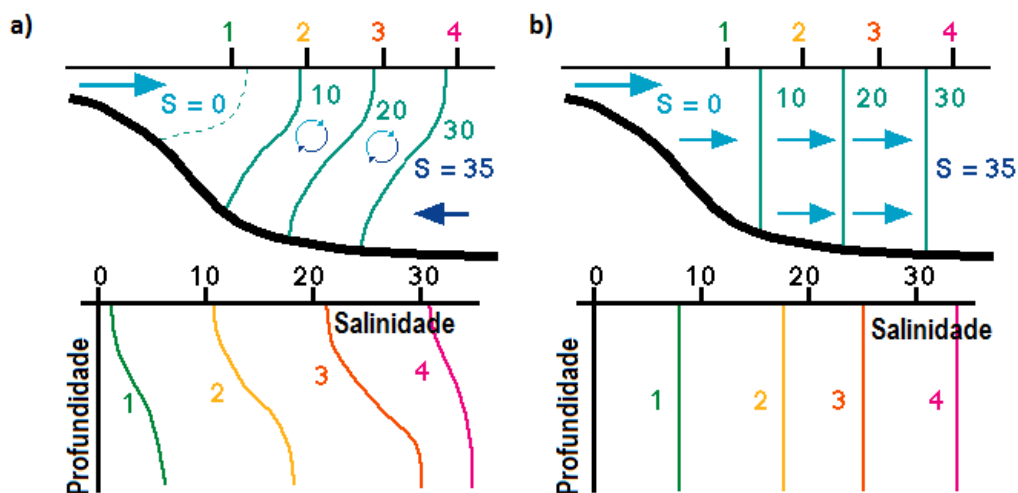


Fig.2.9 – a) Estuário Parcialmente Misturado; b) Estuário Verticalmente Homogêneo (Tomczak (1996)).

Os critérios de classificação de acordo com a geomorfologia e a variação da salinidade, embora estudados separadamente, apresentam entre si alguma correspondência. Assim, por exemplo, estuários de vales inundados em planícies costeiras são, em geral, do tipo parcialmente misturados, tendendo a verticalmente homogêneos em regiões de pequena descarga de água doce. Nas regiões de grande descarga fluvial e pequenas amplitudes de maré (micro e mesotidais), podem prevalecer os tipos cunha salina e altamente estratificado.

### 2.3.2 CLASSIFICAÇÃO DE ACORDO COM O CRITÉRIO PROPOSTO POR PRITCHARD (1967)

Pritchard (1967) propõe uma classificação dos estuários de acordo com a comparação da respectiva salinidade com a da água do mar onde o estuário desagua (Cardoso da Silva, 2000). Como a definição deste mesmo autor diz a água do mar deve ser mensuravelmente diluída pela água da drenagem continental e, no balanço de água, a soma dos volumes que chegam ao estuário, gerados pela precipitação e pela descarga fluvial, devem ser maiores do que o volume de água transferido para a atmosfera pelo processo de evaporação (Universidade de Coimbra, 2009, Miranda *et al.*, 2002).

Portanto, segundo este critério quando a evaporação à superfície do estuário é inferior ao volume de água doce que entra neste a partir dos rios e da precipitação, estamos perante um *estuário positivo*. A água doce tende a sair flutuando sobre a água salgada, que entra vinda do mar. Nesta situação, a água salgada dilui-se gradualmente, verticalmente, do fundo para a superfície e a salinidade no interior do estuário é inferior à do mar. Este tipo de estuário é típico das regiões temperadas do planeta sendo a sua característica mais marcante, por conseguinte, a entrada de água salgada junto ao fundo e a saída da água doce à superfície (Universidade de Coimbra, 2009, Miranda *et al.*, 2002).

*Estuário negativo* ou *inverso* ocorre quando a evaporação à superfície excede a quantidade de água doce que entra no estuário, tornando o estuário hipersalino. A água superficial tende a tornar-se mais salgada que a das camadas inferiores e, em consequência, a afundar. Por conseguinte, neste caso, quer a água do mar quer a água doce entram no estuário à superfície. No seu conjunto, a tendência será sempre para as águas superficiais aumentarem de densidade, afundarem e saírem do estuário para o mar junto ao fundo. Este tipo de estuário é muito frequente em regiões tropicais, embora possa também ocorrer em regiões temperadas se o fluxo de água doce fluvial for muito limitado. Entretanto, este ambiente não pode ser classificado de estuário de acordo com a definição de Pritchard, o qual revela alguma incoerência (Universidade de Coimbra, 2009, Miranda *et al.*, 2002).

Na situação em que, ocasionalmente, a evaporação iguala o fluxo de água doce que entra no estuário designa-se por *estuário neutro*. Neste caso ocorre um regime de salinidade estático. Por razões óbvias trata-se de um tipo de estuário muito raro (Universidade de Coimbra, 2009, Miranda *et al.*, 2002).

## 2.4. TRANSPORTE SEDIMENTAR

### 2.4.1 ORIGEM E TRANSPORTE DOS SEDIMENTOS ATÉ AOS ESTUÁRIOS

Os sedimentos são fragmentos de rochas e minerais que resultam da erosão e do desgaste da superfície terrestre, a qual sofre um processo contínuo de mudança, quer resultado da acção da água, da acção do vento (a uma menor escala), de acidentes tectónicos e mais recentemente devido à acção do homem. O ciclo geológico de formação rochosa, erosão, sedimentação e deposição está para além de uma vida humana, mas não faltam provas por todo o lado, quer a uma escala menor, intemperismo, quer a uma escala global, dorsal meso-oceânica. Os estuários são um elemento importante neste ciclo, pois grande parte dos sedimentos encontrados no fundo dos oceanos são provenientes da terra e atingem o oceano através dos rios e seus estuários.

A acção da água sobre o solo pode assumir duas formas distintas: a erosão, que se caracteriza por um processo lento mas continuado no tempo ou os movimentos de massa que se sucedem de forma brusca, geralmente concentrada no tempo, e que estão, apesar de também relacionadas com as condições da precipitação, mais fortemente relacionadas com as condições geológicas e geotécnicas do terreno. A figura 2.10 representa os movimentos de massa, Lencastre e Franco (2006), citado por Lameiro (2009).

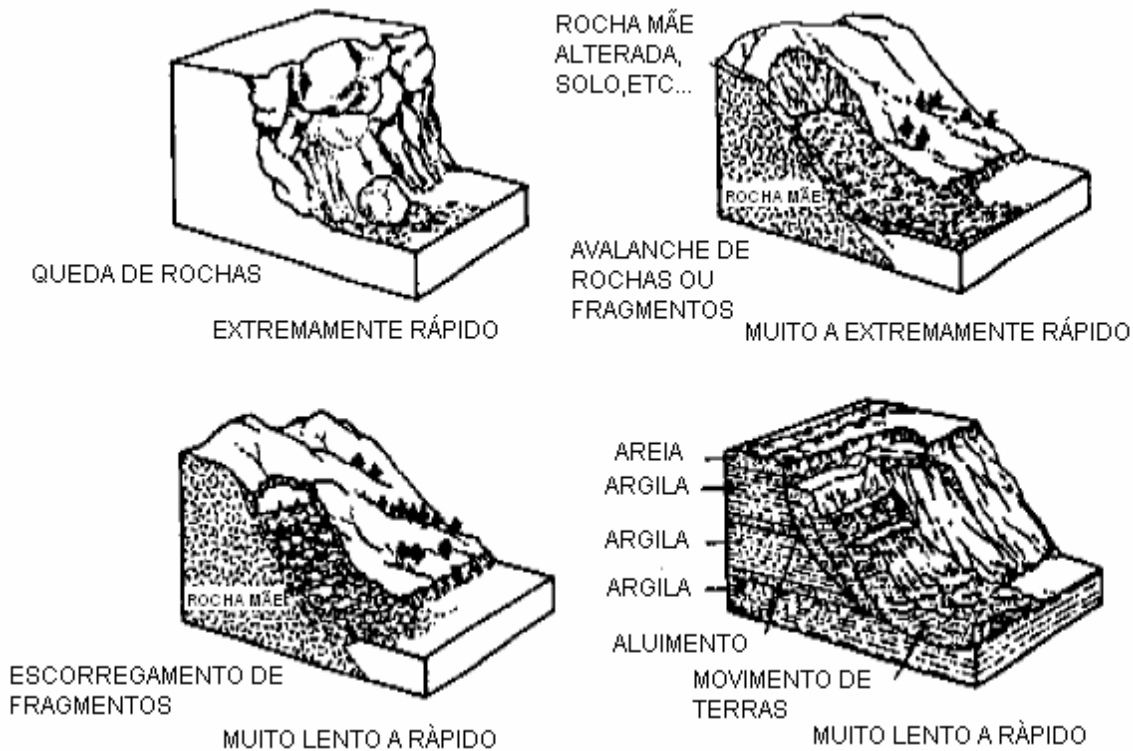


Fig.2.10 – Movimento de massa (Lencastre e Franco (2006), retirado de Lameiro (2009)).

Um escoamento superficial estabelece-se quando a intensidade da chuva se sobrepõe à capacidade de infiltração da água no solo. Os materiais levantados pelo impacto das gotas são transportados ao longo das encostas por este escoamento que tem também um certo poder erosivo, tanto maior quanto maior for a altura da água e a inclinação do terreno. Do material transportado pelo escoamento superficial, apenas uma parte atingirá as linhas de água, ficando o resto retido no percurso (Lameiro, 2009).

No rio, o transporte de sedimentos pode ocorrer de diferentes formas. Uma parte dos sedimentos são mais densos, quer relativamente à água doce quer relativamente à água salgada, portanto estes apresentam uma tendência para se depositarem no fundo do rio. Para experimentarem movimentação, necessitam de forças de turbulência que os agitem e estes deslizando, rolando e escorregando (figura 2.11), movimentam-se para jusante até a turbulência diminuir e voltarem a depositar-se no leito do rio (Tomczak, 2000). Neste tipo de transporte, as partículas têm uma velocidade de deslocação irregular, com um valor médio muito inferior à velocidade de escoamento, Lysne *et al.* (2003), citado por Lameiro (2009). Por outro lado, os sedimentos mais pequenos permanecem praticamente sempre em suspensão, dando o aspecto turvo característico dos rios (Tomczak, 2000). Neste caso, as partículas são transportadas sensivelmente à mesma velocidade do escoamento. É importante referir que a erosão, o transporte e a deposição variam ao longo do curso de água, em função das condições locais.

A capacidade de transporte muda com a inclinação do leito e com o caudal, no entanto o transporte efectivo pode estar limitado pela quantidade local de sedimentos transportáveis fornecidos, Lysne *et al.* (2003), citado por Lameiro (2009).

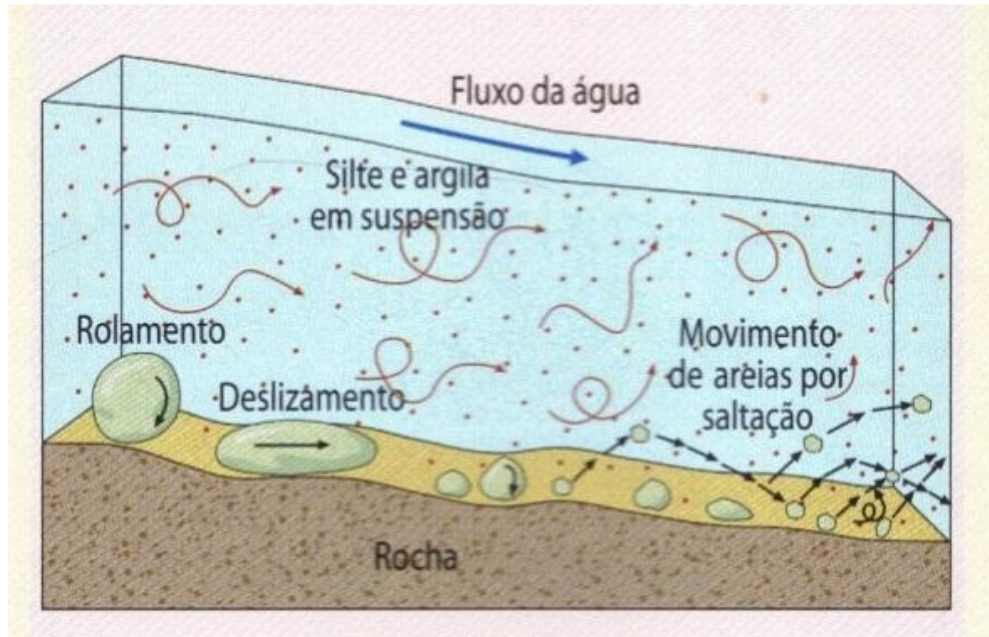


Fig.2.11 – Movimento das partículas.

À medida que os rios e os riachos se movimentam em direcção ao oceano, geralmente, o curso de água tem tendência para aumentar de dimensão e a velocidade do escoamento diminuir. Durante este processo, a deposição de sedimentos, tem a particularidade de se fazer de uma forma gradual; dos sedimentos mais grossos para os mais finos, portanto, a montante encontram-se pedras com maiores dimensões, cascalho grosso entre outros sedimentos mais densos, e por sua vez, a jusante localizam-se os sedimentos mais finos (Oberrecht, sem data(b)), como demonstra a seguinte figura.

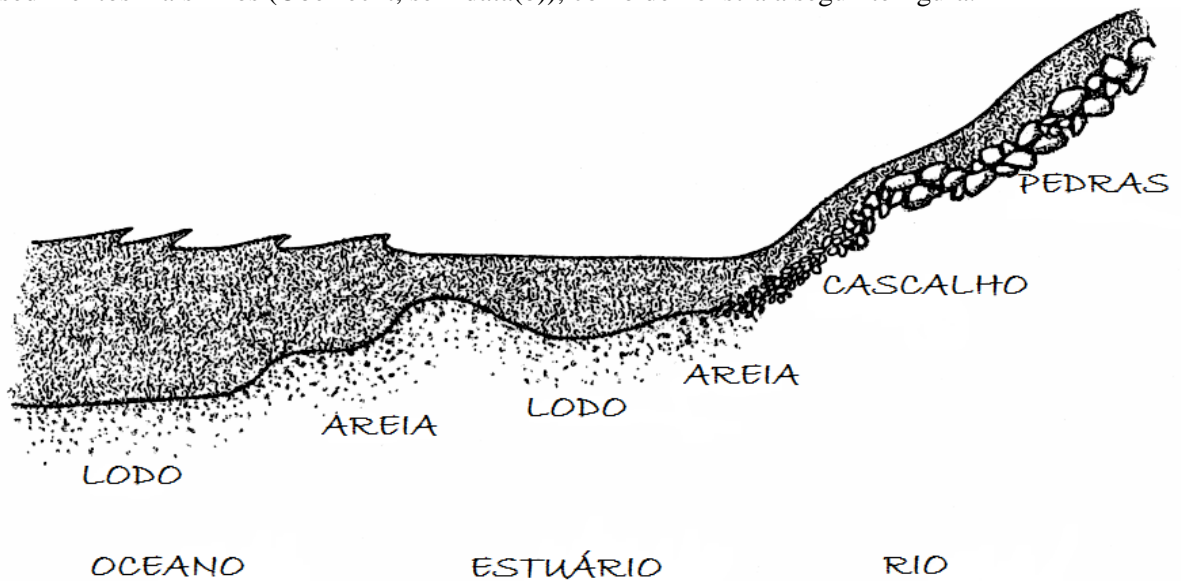


Fig.2.12 – Perfil longitudinal dos sedimentos depositados ao longo de um rio (Oberrecht, sem data(b)).

#### 2.4.2 OS SEDIMENTOS NOS ESTUÁRIOS

O transporte de sedimentos nos estuários é bastante diferente em relação ao que se passa no resto do rio. Nestes ambientes naturais, a descarga fluvial encontra a maré, e a corrente desta assume um papel gerador de turbulência. A partir deste momento existe apenas um pequeno período de tempo entre a subida e a descida da maré (nível máximo ou nível mínimo) cuja turbulência é mínima; nesse intervalo de tempo, os sedimentos mais pesados têm a possibilidade de se depositarem no leito do estuário. À medida que a corrente volta novamente a aumentar, as partículas elevam-se para a coluna de água, mas ao contrário da água doce que continua a escoar-se ao longo do estuário na camada superior, as partículas estão agora na camada mais baixa da circulação estuarina, onde o movimento médio da água é a do oceano em direcção a montante. Portanto, uma parte dos sedimentos nunca chega a alcançar o mar e acumula-se no estuário numa região situada perto de onde o rio entra no estuário, ou seja, onde a circulação muda de apenas uma camada para duas (Tomczak, 2000).

Os sedimentos permanecem em suspensão devido à turbulência, mas a sua concentração na coluna de água varia fortemente com a maré. Durante a vazante existe uma maior concentração de sedimentos relativamente à enchente, o que sugere que nem toda a quantidade de sedimentos volta com a enchente da maré; uma pequena parte parece capaz de avançar em direcção à embocadura (Tomczak, 2000).

Existe também uma variação de sedimentos em suspensão com a mudança da amplitude de maré. As correntes da maré baixa durante o período de marés mortas permitem que uma grande parte de sedimentos se depositem no fundo do estuário. À medida que a amplitude da maré cresce, cada vez mais sedimentos entram em suspensão, porém é necessário uma maior velocidade para erguer os sedimentos do solo do que apenas mantê-los em suspensão, portanto o aumento de concentração de sedimentos de uma maré para a outra é lenta. Quando se atingem as marés vivas e a amplitude de maré começa a diminuir, uma grande quantidade de sedimentos continua quase permanentemente suspensa, e a sua concentração diminui lentamente. Como resultado, a concentração de sedimentos é maior, para a mesma amplitude de maré, durante o período de marés vivas para as marés mortas do que das marés mortas para as marés vivas (Tomczak, 2000).

A acumulação de grande quantidade de sedimentos nos estuários, pode criar problemas na navegação, pelo que, para evitar esse problema são necessárias operações contínuas de dragagens.

O caudal fluvial escoado apresenta uma grande influência na quantidade de sedimentos que permanecem em suspensão. Um dos efeitos causados devido à variação da descarga fluvial, consiste na subida e descida da zona de acumulação de sedimentos, designada por região de turbidez, que responde ao aumento e à diminuição do escoamento fluvial. Portanto, a descarga fluvial é um factor chave para os sedimentos saírem do estuário para o oceano. Uma grande descarga fluvial empurra a região de turbidez para jusante, e com a elevada turbulência associada ao escoamento médio, mantém os sedimentos em suspensão por mais tempo, o qual permite que estes se propaguem pela região de turbidez sem serem presos. No entanto as cheias não são sempre benignas e podem causar destruição em áreas baixas, devido à descarga de grandes quantidades de água em pouco tempo (Tomczak, 2000). Por outro lado, as cheias também podem ter efeitos contrários, que consistem no aumento da sedimentação no estuário. A água doce carregada de lodo esco para dentro do estuário e acaba por se depositar na camada inferior da água salgada (Swales *et al.*, 2003).

Um outro fenómeno que afecta o sistema sedimentar designa-se por floculação, que consiste num processo em que as partículas minúsculas se juntam, tornando-se num corpo mais pesado que acabam por se depositar no fundo. Na água doce, essa partícula mantém-se em suspensão devido ao seu movimento molecular e são portadoras de cargas negativas pelo que existe uma tendência para se repelirem umas às outras. Por sua vez, nos estuários, onde a água doce se mistura com a água salgada

ionicamente carregada, as cargas negativas são neutralizadas e as partículas atraem-se. À medida que colidem, tendem a fundir-se ou a unir-se formando agregados maiores ou aglomerados de sedimentos chamados flocos. Este processo depende dos níveis de salinidade, consequentemente podem sofrer alterações ao longo do estuário. Pode ainda variar de maré para maré e de estação para estação, ou de acordo com a quantidade de escoamento (Oberrecht, sem data(b)).

As marés e as ondas também alimentam o estuário com sedimentos, geralmente mais grossos, provenientes dos oceanos (Bell *et al.*, 2000, Oberrecht, sem data(b)). Portanto, cria-se um gradiente de sedimentos, desde a embocadura até ao início do estuário, com uma variação de sedimentos grossos para finos (Oberrecht, sem data(b)).

#### 2.4.2.1 Alteração do balanço sedimentar nos estuários

Contudo, o balanço sedimentar tem sido afectado e alterado pela actividade humana em redor dos estuários, principalmente por acções que provocam o aumento da erosão e pela alteração dos padrões naturais do fluxo da água. Por exemplo, o desenvolvimento de portos e marinas prendem os sedimentos mais finos e pode ser necessário recorrer a dragagens regulares para evitar a sua acumulação. A desbastação de florestas aumenta a vulnerabilidade do solo à erosão, de facto, qualquer actividade que leva ao desenvolvimento de lama e lodo representam uma ameaça para os estuários (Bell *et al.*, 2000, Nicholls, 2002).

Todavia, as barragens têm também um papel muito importante na alteração do desempenho natural do rio. Além de modificarem o fluxo natural do rio, também alteram o balanço sedimentar, ao aprisionarem os sedimentos nas albufeiras, não deixando ocorrer o seu escoamento natural para jusante e criando paralelamente um outro problema de aglomeração de sedimentos nas suas albufeiras.

Numa albufeira, a velocidade de escoamento é muito reduzida, o que conduz à diminuição da capacidade de transporte de sedimentos e leva à deposição de alguns sedimentos. Tipicamente, as partículas maiores em suspensão e a maior parte das partículas transportadas por arrastamento são imediatamente depositadas formando um delta à entrada da albufeira, como ilustra a figura 2.13, enquanto que os sedimentos mais finos em suspensão se depositam mais à frente. A eficiência de aprisionamento dos sedimentos nas grandes albufeiras, onde a velocidade é muito lenta, pode aproximar-se dos 100%, o que significa que todos os sedimentos que entram ficam retidos na albufeira. Ao longo do tempo, a deposição de sedimentos nas albufeiras levará a uma redução do volume de armazenamento de água, o que pode conduzir ao preenchimento completo do seu volume, Morris e Fan (1998), citado por Hoven (2010).



Fig.2.13 – Padrão típico de deposição do sedimentos nas albufeiras (Lameiro, 2009).

Para o cálculo da vida útil de uma barragem projectada, é comum ser feita uma estimativa do progresso dos sedimentos acumulados na albufeira. É um processo complexo que é geralmente subestimado e que leva a um tempo de vida útil menor da que o previsto, Morris e Fan (1998), citado por Hoven (2010).

Os levantamentos batimétricos são efectuados para determinar a perda de volume de armazenamento ao longo do tempo. Através da comparação dos levantamentos efectuados no passado, obtém-se informação sobre a evolução da deposição dos sedimentos na albufeira e a perda de volume de armazenamento da água, Morris e Fan (1998), citado por Hoven (2010).

Para evitar a perda de capacidade de armazenamento, são tomadas algumas medidas de mitigação. Um método comum são as descargas da albufeira. Neste processo, as comportas da barragem são abertas e o nível de água diminui. Isto conduz a um aumento da velocidade da água na albufeira provocando a erosão dos sedimentos e dando origem a um elevado grau de concentração na água, que posteriormente é libertada. Com regulares descargas da albufeira, a acumulação de sedimentos pode ser evitada ou pelo menos diminuída. Normalmente as albufeiras com problemas de sedimentação são descarregadas anualmente, Morris e Fan (1998), citado por Hoven (2010).

O esquema da figura 2.14 esquematiza o balanço de entrada e saída de sedimentos numa albufeira.

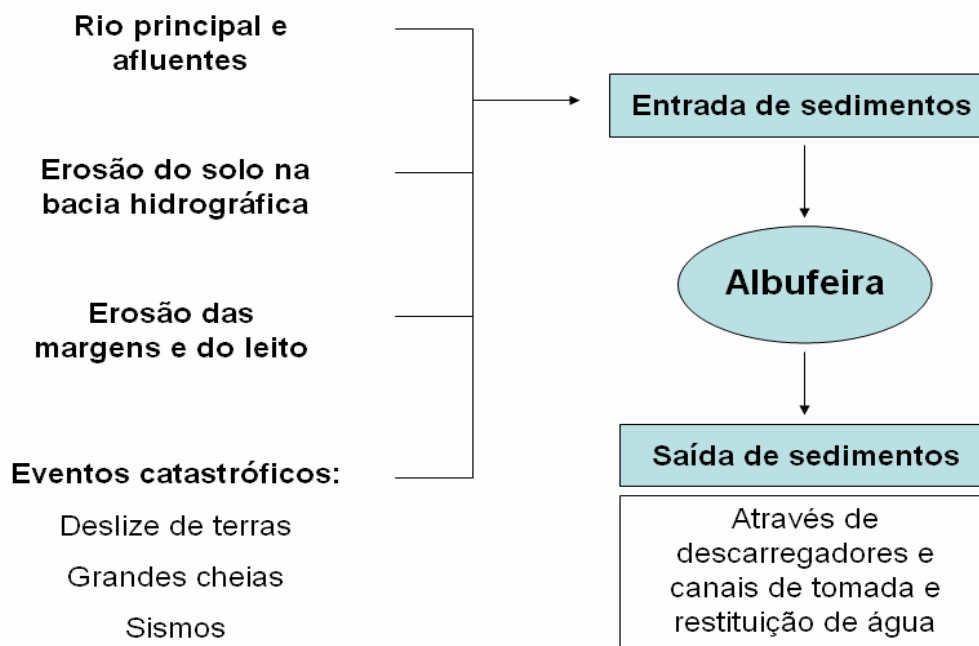


Fig.2.14 – Balanço de sedimentos numa albufeira, (Batuca e Jordaan (2000) retirado de Lameiro (2009))

Outro assunto que tem tido cada vez mais impacto está relacionada com a falta de sedimentos no litoral, que se deve, entre outros factores, à retenção de sedimentos nas albufeiras das barragens. Devido à alteração do balanço sedimentar nas zonas costeiras verifica-se, como consequência, a erosão das praias (emagrecimento em areia, recuo das arribas e galgamento do sistema dunar), fenómeno este quase global à escala planetária, que preocupa as populações, principalmente as que vivem na zona costeira, bem como os gestores de recursos naturais e os próprios governos.

Segundo Dias e Boski (1997) citado por Costa (2005), o problema de migração das zonas costeiras resulta directamente em 10-20% da subida do nível médio da água do mar e uns 80-90% da redução

dos sedimentos. Embora não refiram as barragens subentende-se que é um factor que tem um grande influência.

Apesar de ainda ser um tema bastante complexo e sem solução à vista, há quem proponha a implementação de um caudal ecológico para os sedimentos tal como existe para a água, ainda que não se saiba bem a viabilidade de tal medida, mas poderá vir a mitigar alguns problemas.



# 3

## CASO DE ESTUDO: ESTUÁRIO DO RIO MINHO

### 3.1. O RIO MINHO

Com apenas um quarto de seu curso em Portugal, onde dá nome à região do extremo litoral norte do país, o rio Minho serve de fronteira entre o norte de Portugal e a Galiza. Situado no noroeste da península ibérica com orientação nordeste-sudoeste, o rio Minho nasce em Espanha, na Serra de Meira a uma altitude de 750 m. Tem um comprimento aproximado de 300 km, dos quais 230 km são percorridos em Espanha e um troço internacional com apenas uma extensão de 70 km, de Melgaço até à sua foz, no oceano Atlântico, em frente a Caminha e a La Guardia (Instituto da Água, 2000).

O rio Minho banha, entre outras, as povoações de Lugo, Orense e Tui, em Espanha, e Valença do Minho e Caminha, em Portugal. Os principais afluentes da parte portuguesa são os rios Trancoso, Mouro, Gadanha e Coura, localizados na margem esquerda. Em Espanha, os principais afluentes na margem direita são os rios Támoga, Ladra, Ferreira, Avia e Tea e na margem esquerda os rios Neira, Sil e Arnoya. O rio Sil, principal afluente do rio Minho, tem cerca de 226 km de comprimento e a sua bacia uma área de cerca de 7983 km<sup>2</sup> (47% do total da área da bacia do rio Minho). O troço internacional do rio Minho faz fronteira com Espanha, desde as confluências dos rios Trancoso e Barjas, até à foz no Oceano Atlântico (Moura, 1990).

A área total da bacia hidrográfica do rio Minho é de 17 080 km<sup>2</sup>, dos quais 798 km<sup>2</sup> (cerca de 5%) estão situados em território português e localiza-se no extremo noroeste do país, entre as coordenadas 41°45' e 43°40' de latitude e 6°10' e 8°55' de longitude W. Os limites da bacia são constituídos, a sul, pela do rio Lima e pelas ribeiras da costa atlântica portuguesa, a sudoeste pela bacia do rio Douro e a norte pelas da costa espanhola (Instituto da Água, 2000).

Em Portugal, esta é a segunda bacia internacional mais pequena, a seguir à do rio Lima. Na parte espanhola devido à dimensão do rio Sil, esta bacia hidrográfica denomina-se por “Miño-Sil”.

A Figura 3.1 apresenta a localização geográfica da bacia hidrográfica da parte espanhola. É importante referir que, em estudos espanhóis, é habitual englobarem a bacia hidrográfica do rio Lima, devido à sua pequena dimensão.

Já na Figura 3.2 é apresentada a parte portuguesa da bacia hidrográfica do rio Minho e a sua delimitação.



### 3.2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO ESTUÁRIO DO RIO MINHO

Até recentemente, sabia-se muito pouco sobre a dinâmica do estuário do rio Minho (Santos *et al.*, 2009). Contudo, entre 2005 e 2007, o projecto «Contribuições Estuarinas para a Dinâmica da Plataforma Interna» (ECOIS, no seu acrónimo em inglês), que visava avaliar de que forma a variabilidade no escoamento fluvial do rio Douro e do rio Minho influenciava a dinâmica costeira e entender como e quando se processam as trocas com a plataforma continental, melhorou esse conhecimento.

O projecto ECOIS teve como principais objectivos caracterizar os estuários dos rios Minho e Douro sob o ponto de vista dinâmico, hidrológico, sedimentológico e biológico, com ênfase nas trocas com a plataforma continental, em situação de caudal significativo, centrando a atenção no papel desempenhado pela propagação da onda de maré no estuário.

Trata-se de um estudo interdisciplinar que emprega técnicas de observação, e que se desenvolveu em diferentes campanhas. A primeira decorreu em Setembro de 2005, em situação de escoamento mínimo (estiagem) e outras duas decorreram nos Invernos de 2006 e 2007, com um grande caudal fluvial (Hidromar, 2005).

Devido a este programa foram desenvolvidos vários estudos em diversas áreas para a caracterização do estuário do rio Minho, e foi um grande passo para a compreensão da hidrodinâmica e da sedimentação deste estuário.

#### 3.2.1 LIMITES DO ESTUÁRIO

Considerando que, por definição, a secção-limite de um estuário é aquela até onde se faz sentir a cunha salina, pode afirmar-se que o estuário do rio Minho está compreendido sensivelmente desde Valença até à sua foz, limitada pelo triângulo Ponta do Pico/Ilha da Ínsua/Ponta Ruiva (Instituto da Água, 2000).

Por outro lado, Zacarias (2007), fundamentando-se no Plano Nacional da Água (2001), delimita o estuário tendo em conta a salinidade apenas com uma extensão de 8,9 km desde a Barra até Gondarém, com uma superfície de 500 ha. No entanto, afirma que a influência da maré estende-se até 42 km da barra, englobando uma área a rondar os 2000 a 3000 ha. O estudo do LNEC (2007), por outro lado, refere que a maré se faz sentir até 5 km para montante de Valença (km 29), atingindo, portanto, o estuário, um comprimento de cerca de 34 km e uma área aproximada de 2200 ha.

#### 3.2.2 CAUDAIS

A bacia hidrográfica do rio Minho possui uma estação hidrométrica na foz do rio Mouro, a jusante da barragem de Frieira (Espanha), designada por Foz do Mouro (01G/03H). Esta estação pertence ao Instituto da Água (INAG), e os dados estão disponíveis no sítio da Internet desta entidade ([www.inag.pt](http://www.inag.pt)). Esta estação entrou em funcionamento em 1973 e drena uma área de 15500 km<sup>2</sup>, o que equivale aproximadamente a 91% do total da bacia hidrográfica.

Como demonstra a figura 3.3, o escoamento médio, no período de 1973/74 a 1996/97, em Foz do Mouro foi de 9621,5 hm<sup>3</sup>. Em termos de caudais médios anuais, verifica-se que na Foz do Mouro os valores observados variam entre 127,2 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> e 501,2 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> com um valor médio de 304,9 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

Na barragem de Frieira, no período de 1970/71 a 1994/95, registou-se um caudal médio de 264,5 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (Instituto da Água, 2000).

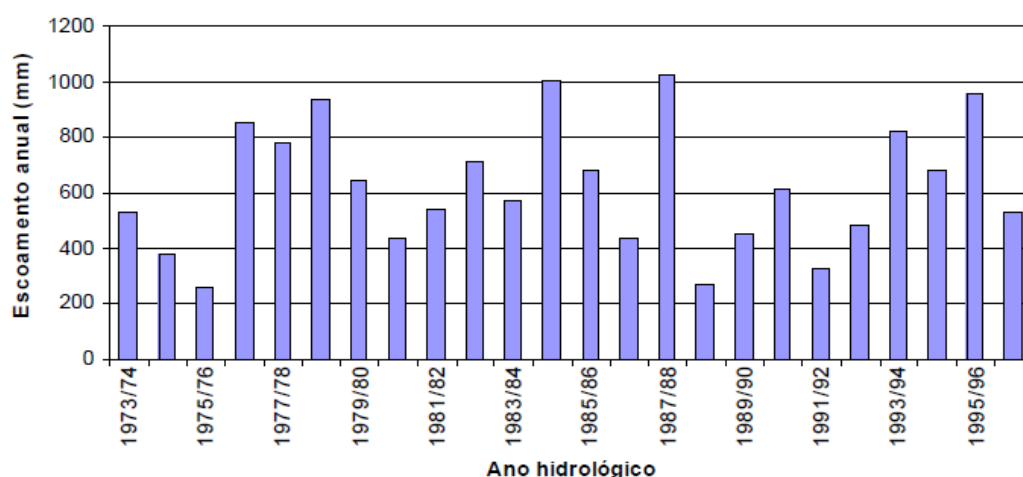


Fig.3.3 – Evolução do escoamento anual na estação hidrométrica de Foz do Mouro (Instituto da Água, 2000).

A tabela 3.1 retirada do PBH do Minho (2000), refere-se ao estudo de caudais de cheias associados a vários períodos de retorno. Este estudo foi efectuado através da análise estatística dos valores de caudal instantâneo máximo anual observados e através da modelação matemática de eventos pluviosos extremos.

Tabela 3.1 – Caudais de cheia no rio Minho (Instituto da Água, 2000).

Período de retorno (anos)	2	5	10	50	100
Foz do Mouro (Minho)	2000	3200	4000	5500	6100
Caudais (m <sup>3</sup> /s)					
Puentearreas (Tea)	310	450	550	800	910
Tui (Louro)	60	100	130	180	200

A análise estatística foi efectuada com base nos valores observados através da única estação portuguesa na área do Plano da Bacia (estação hidrométrica de Foz do Mouro). Adicionalmente consideraram-se também os valores observados em duas estações espanholas localizadas nos afluentes da margem direita do rio Minho, Tea e Louro.

As cheias desempenham um papel muito importante no transporte sedimentar, pois durante este fenómeno grande parte dos sedimentos é transportado para o estuário (Swales *et al.*, 2003), e deste para o oceano (Tomczak, 2000). Portanto a informação dos caudais de cheias é útil para uma sólida compreensão sobre esta matéria.

### 3.2.3 BATIMETRIA

O rio Minho tem sido periodicamente alvo de levantamentos hidrográficos. Os últimos foram efectuados no ano 2004, pelo CEDEX de Espanha e em 2006, no âmbito do projecto ECOIS, foi realizado um levantamento topo-hidrográfico pela Brigada do Instituto Hidrográfico, figura 3.4.

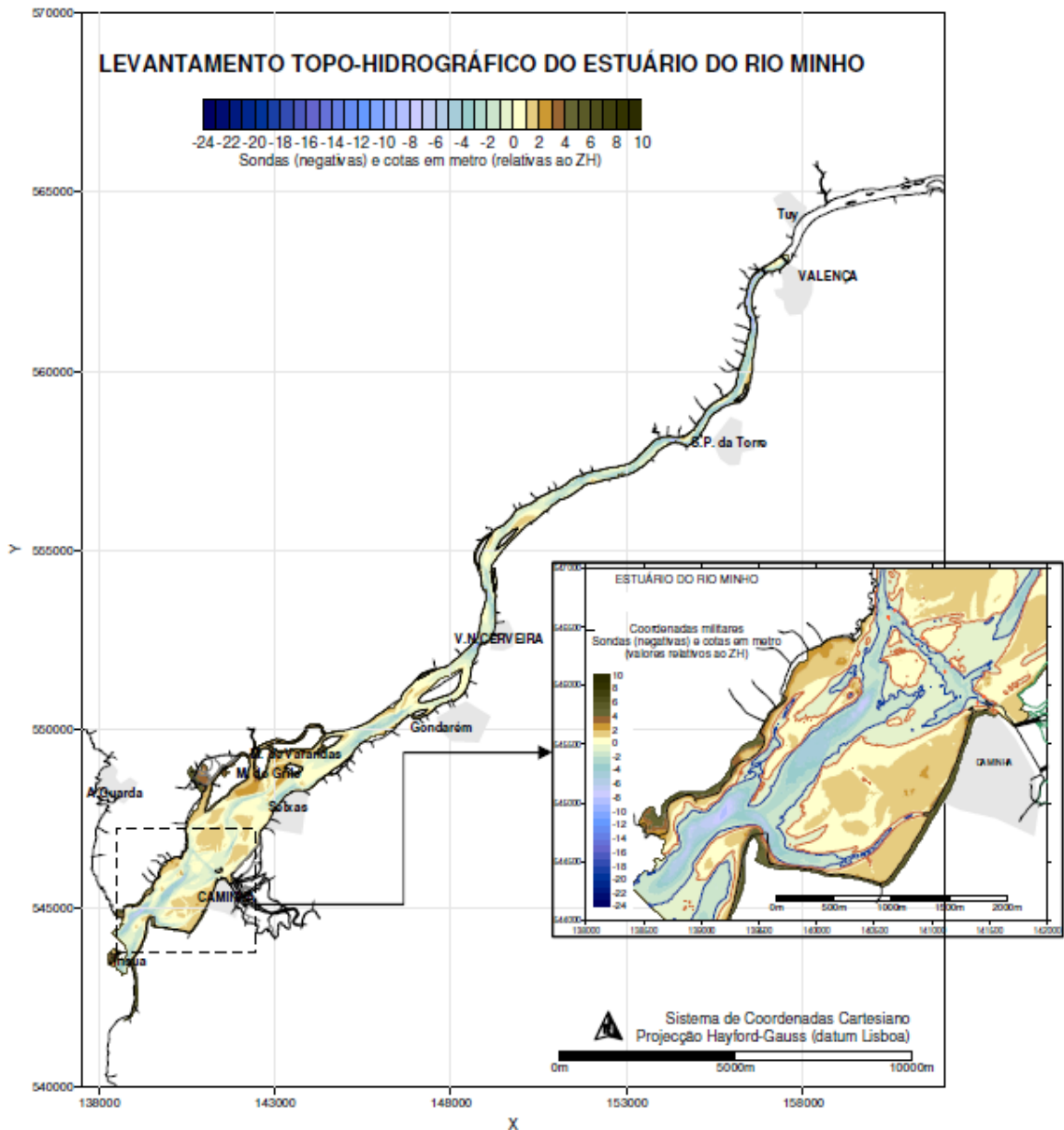


Fig.3.4 – Levantamento topo-hidrográfico de estuário do rio Minho efectuado pelo Instituto Hidrográfico (Reis, 2008).

Com base no levantamento de 2006, verificou-se que, até aproximadamente Vila Nova de Cerveira, o estuário é relativamente pouco profundo, largo e caracterizado pela abundância de bancos de areia. Alguns deles ficam imersos em períodos de baixa-mar formando ilhas. De Vila Nova de Cerveira para montante, o estuário é mais estreito e profundo, podendo atingir profundidades que chegam aos 12 m. A profundidade média de todo o estuário é de cerca de 4 m ao ZH, atingindo um máximo de 23 m perto de Vila Nova de Cerveira (Zacarias, 2007). Contudo, ao analisar o mesmo levantamento, Santos *et al.* (2009) concluem que o estuário tem uma profundidade média ainda menor, com apenas 3 m.

O estuário apresenta diversas ilhas de origem sedimentar, como a ilha da Boega, próxima de Vila Nova de Cerveira, e, mais a jusante, as ilhas Morraceira das Varandas, Morraceira do Grilo e Canossa, próximas da margem espanhola. O Forte da Ínsua é uma fortaleza militar situada na pequena ilha de

Ínsua, sendo o elemento que mais sobressai na embocadura do rio. Localiza-se exactamente no lado sul da foz do rio Minho a cerca de 200 m da costa.

De um modo geral, a largura do estuário aumenta de montante para jusante. Na zona mais a montante, a largura varia entre cerca de 150 e 600 m e, na zona intermédia e na foz, entre cerca de 600 a 2000 m. Regista-se um valor mínimo de 150 m próximo de Vila Nova de Cerveira e um valor máximo de 2000 m a montante de Caminha, próximo da foz do Coura. A largura da secção da embocadura é cerca de 600 m (LNEC, 2007).

### 3.2.4 MARÉS

Na costa oeste portuguesa as marés astronómicas propagam-se de Sul para Norte, são semi-diurnas e regulares, ou seja, um regime de maré com periodicidade de cerca de 12 horas e 25 minutos (meio dia lunar), caracterizado por duas preias-mar e duas baixas-mar em cada período ou ciclo de maré, ou seja, em cada dia lunar (24 horas e 50 minutos).

Um dos objectivos do programa ECOIS foi também examinar a propagação da maré no interior do estuário. Para a realização desse estudo, foram instalados ao longo do estuário três marégrafos de pressão, nas localidades de Caminha, Vila Nova de Cerveira e Segadães.

Além desses instrumentos foram instalados correntómetros RCM9, munidos de sensores de pressão, nas localidades da Barra do Minho, Seixas e São Pedro da Torre. A estação maregráfica de Viana do Castelo foi utilizada para comparar a maré no interior do estuário com a de um ponto oceânico, num local próximo. Esta estação é a que apresenta uma amplitude de maré maior e uma curva mais regular.

As figuras 3.5 e 3.6 representam as alturas dos marégrafos de pressão e de todos os sensores de pressão RCM9 fundeados no estuário.

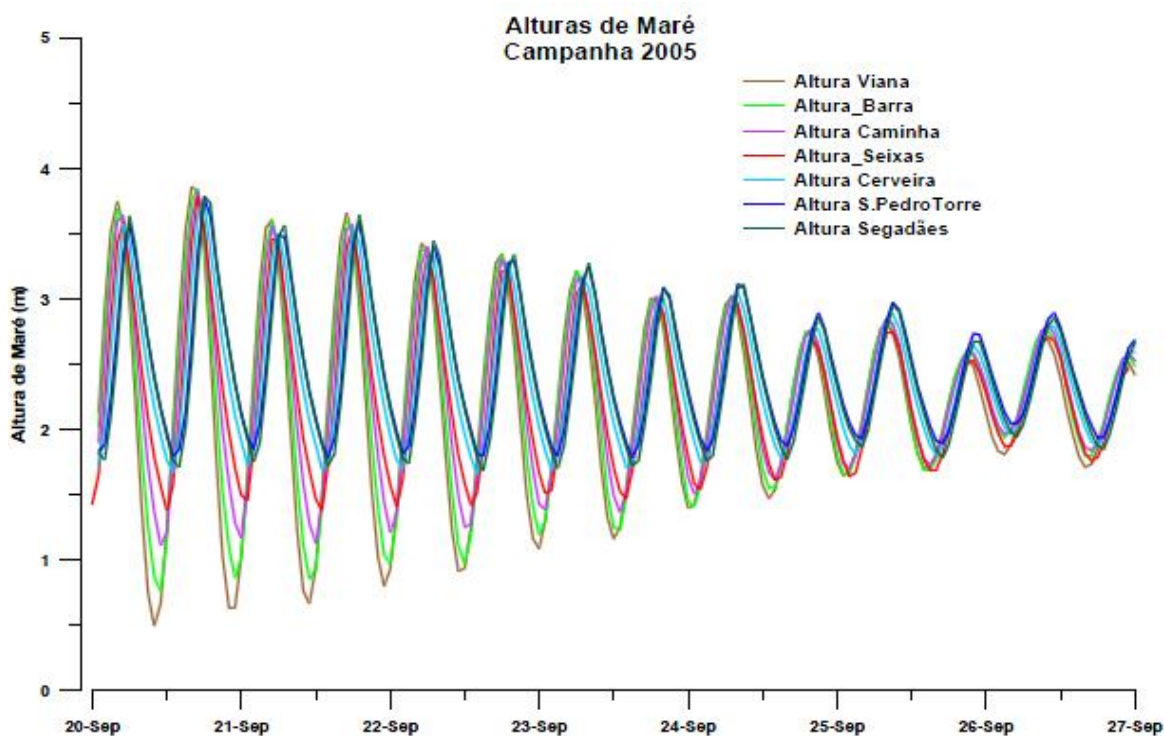


Fig.3.5 – Altura de maré para os marégrafos de pressão e sensores de pressão dos RCM9 em Setembro de 2005 (Zacarias, 2007).

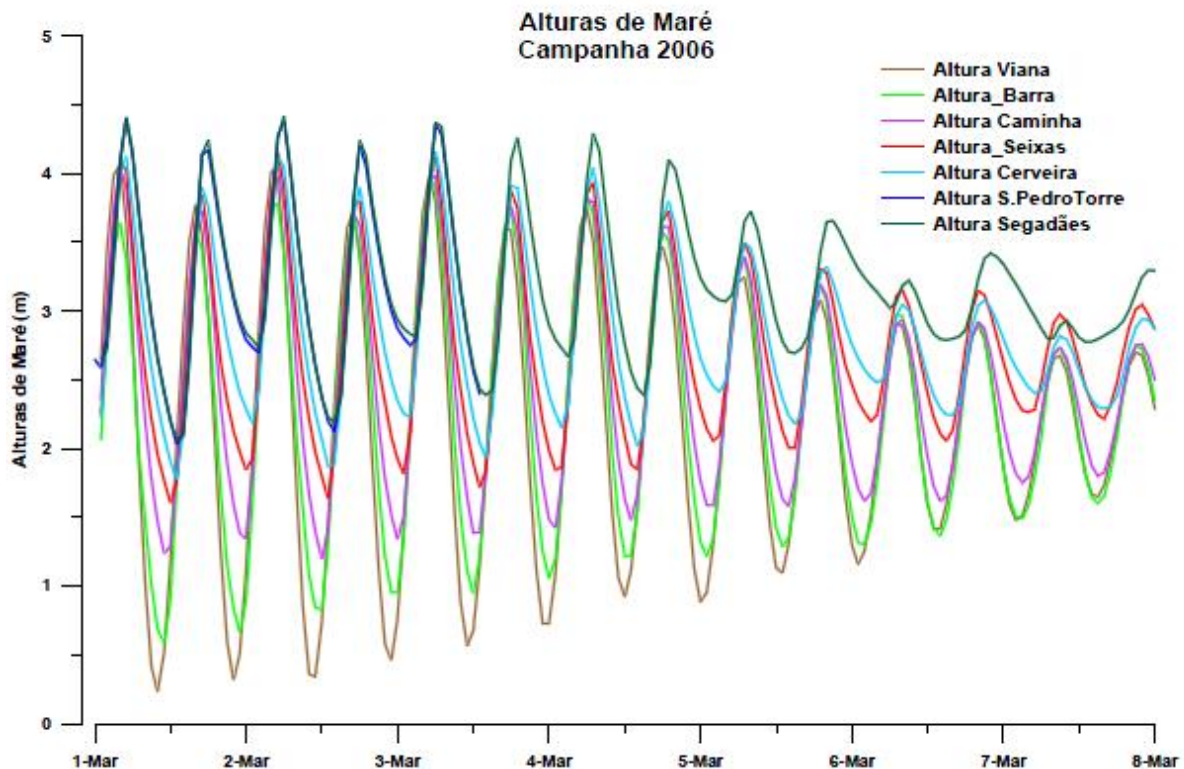


Fig.3.6 – Altura de maré para os marégrafos de pressão e sensores de pressão dos RCM9 em Março de 2006 (Zacarias, 2007).

Da análise destas figuras, podem-se observar diversos aspectos interessantes referidos seguidamente. Em todas as estações verifica-se uma desigualdade quinzenal na amplitude da maré, isto é, as marés vivas e as marés mortas apresentam variação da sua amplitude com o tempo, como seria de esperar. Constata-se também que tanto na primeira campanha como na segunda, à medida que se caminha para montante os valores das baixa-mares vão sendo maiores. Isto leva a uma diminuição da amplitude da maré no mesmo sentido, de forma marcada desde a Barra até V.N. de Cerveira, mas para montante desta localidade, essa diminuição já não é tão notória. Entre S. Pedro da Torre e Sagadães, em Setembro, essa diferença é menor do que nos outros locais. Já em Março as alturas das baixa-mar são coincidentes nesses dois pontos do estuário.

A curva de maré em Viana do Castelo apresenta um comportamento aproximadamente sinusoidal, mais regular e com uma amplitude de maré maior, enquanto as do interior do estuário apresentam algumas assimetrias, quer relativamente ao nível médio, quer relativamente à duração da enchente, quando comparada com a da vazante. Essa diferença temporal revela que a enchente aparenta ser mais reduzida relativamente à duração da vazante. Este facto pode estar relacionado com zonas de pouca profundidade ou constrangimentos batimétricos e como foi anteriormente referido, desde Vila Nova de Cerveira até à embocadura, o estuário é relativamente pouco profundo. Nessas zonas, a água escoar-se apenas por um canal estreito e pouco profundo fazendo com que o escoamento seja lento abaixo da meia maré, não havendo tempo para se realizar totalmente até à baixa-mar.

Outro aspecto é o defazamento no tempo entre as curvas de maré nos vários locais em comparação, ou seja, os instantes de preia-mar e baixa-mar não são os mesmos, ocorrendo primeiramente a maré em Viana do Castelo e só depois no estuário: na Barra, em Caminha, em Seixas, em Vila Nova de Cerveira, em São Pedro da Torre e finalmente em Segadães.

Por fim, observou-se que a partir de 5 de Março de 2006 a deformação da onda de maré é diferente de Seixas para montante. Esse período corresponde a um aumento do valor médio do caudal em cerca de 250 m<sup>3</sup>/s. Deste modo, devido ao elevado caudal fluvial que foi registado durante esse período houve uma deformação da onda da maré nas zonas mais a montante do estuário do Minho. Conclui-se portanto, que a curva da maré, como seria de esperar, é influenciada pelo caudal fluvial, em particular em situações de caudal elevado (Reis, 2008; Reis *et al.*, 2009; Zacarias, 2007).

Antes deste dados recolhidos pelo programa ECOIS, o LNEC (2007) caracterizou também a maré no estuário do rio Minho, tabelas 3.2 e 3.3. Esse estudo conclui que ocorre uma redução significativa da amplitude de maré entre a orla costeira e Caminha e refere que esse fenómeno já se verificava no passado (século XIX), sendo a amplitude média da maré no Cabedelo semelhante à da costa (2,2m) e a de Caminha inferior (1,7m). Tal como no programa ECOIS, a tabela 3.2 indica que a diferença reside nos níveis de baixa-mar particularmente em águas vivas. A ocorrência de níveis de baixa-mar é mais elevadas no interior do estuário do que na costa, atenuando a amplitude da maré.

Tabela 3.2 – Elementos de maré em Caminha e na costa portuguesa (LNEC, 2007).

Local	Alturas de maré ao ZH (m)						
	PMmáx.	PMAV	PMAM	NM	BMAM	BMAV	BMmín.
Caminha	-	3,5	2,7	-	1,5	1,2	-
Viana do Castelo	3,9	3,5	2,7	2,0	1,3	0,5	0,2
Leixões	3,9	3,5	2,7	2,0	1,3	0,5	0,2

Tabela 3.3 – Elementos de maré na costa espanhola referidos ao ZH adoptados na costa portuguesa (LNEC, 2007).

Local	Alturas de maré ao ZH (m)						
	PMmáx.	PMAV	PMAM	NM	BMAM	BMAV	BMmín.
Vilagarcia	4,1	3,8	2,7	2,0	1,3	0,3	-0,1
Vigo	4,1	3,8	2,7	2,0	1,3	0,3	-0,1

### 3.2.5 AGITAÇÃO MARÍTIMA

O conhecimento das características da agitação marítima num dado local e a sua variação no tempo tem uma enorme importância para a realização do estudo do regime hidrodinâmico, da dinâmica sedimentar e da evolução morfológica na embocadura e no exterior do estuário.

Os dados são, em geral, adquiridos por bóias ondógrafo direccionais, que funcionam através de sensores próprios. Actualmente, o Instituto Hidrográfico dispõe de três bóias ondógrafo na costa continental portuguesa Leixões, Sines e Faro (Faria, 2009). Próximo da zona em estudo encontra-se a bóia de Leixões e, do lado espanhol a norte, há uma estação de observação no cabo Sillero.

Carvalho e Barceló (1966) verificaram que na costa ocidental portuguesa as alturas de onda significativas mais frequentes, com 45% de ocorrência, são de 1 m a 2 m, sendo o máximo registado de 11 m, que pode ser ultrapassado em episódios de temporal. A frequência de valores superiores a 3 m corresponde a 15%, e apenas 2% para alturas superiores a 6 m. Os valores mais frequentes de

período significativo da onda variam entre os 9 s e os 11 s, sendo o valor mínimo observado de 6 s e o máximo de 18 s. Estes parâmetros mantêm-se praticamente constantes ao longo de todo o ano, com tendência para diminuir nos meses de Junho, Julho e Agosto (Faria, 2009).

A figura 3.7 representa os registos nas bóias de Leixões e do Cabo Silleiro. Apesar de pequenas diferenças apresentam a mesma tendência no regime de agitação com direcção predominante dos octantes WNW a NNW.

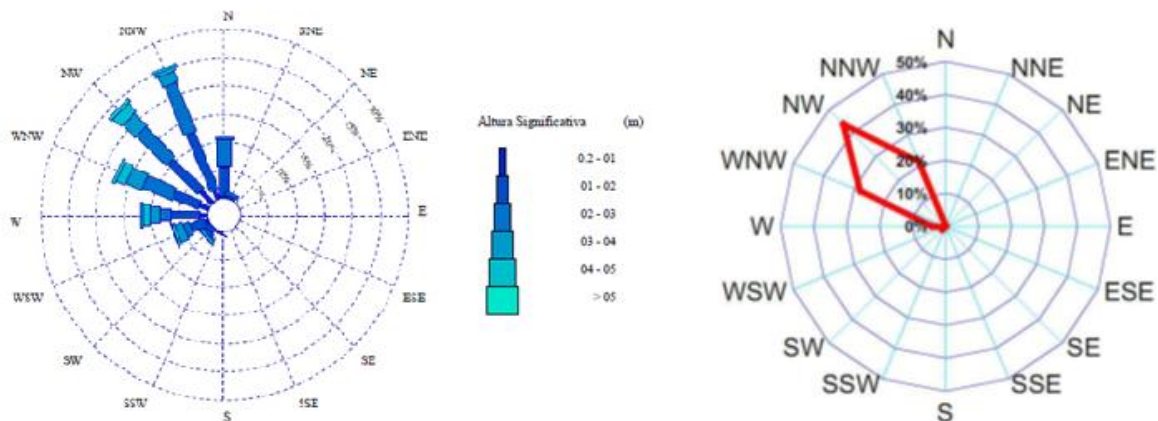


Fig.3.7 - Frequência da direcção das ondas registadas na bóia do cabo Sillero e na bóia de Leixões (Puertos del Estado e Gomes, 2006).

De um modo geral, as ondas desviam-se do seu rumo de forma a ficarem paralelas à costa, fenómeno este que se verifica na zona em estudo e que se designa por refração. Associado a este fenómeno e à complexa morfologia da zona exterior do estuário, resulta um acréscimo dos efeitos por difracção.

### 3.2.6 CORRENTES

Existe um escasso número de observações das correntes no rio Minho, no entanto sabe-se que são dominadas pelas condições da maré e pelo caudal fluvial, e também, pela morfologia local. A influência do caudal fluvial perde importância à medida que caminhamos para jusante, e o contrário passa-se com a influência da maré.

De uma forma geral a evolução da velocidade é típica de uma maré semi-diurna. A velocidade da vazante é superior à da enchente, e a duração da vazante é também superior à da enchente. A corrente é mais forte na embocadura do que no interior do estuário como também é mais forte em águas vivas do que em águas mortas.

O LNEC (2007) disponibilizou alguns dados (tabelas 3.4 e 3.5) com diferentes origens, os quais revelam praticamente o comportamento descrito no parágrafo anterior.

Tabela 3.4 – Observações de correntes de maré em águas vivas (AV) e águas mortas (AM) (LNEC, 2007).

Local	velocidade da corrente (m/s)				Referência
	AV Vazante	AV Enchente	AM Vazante	AM Enchente	
Embocadura	1,4	0,8	0,9	0,6	Instituto Hidrográfico (1978)
Sector inferior*	0,8	0,8	0,6	0,5	Instituto Hidrográfico (1978)
Sector inferior*	1,8	1,4	0,9	0,5	Consulmar (1990)

\*entre o ponto onde convergem os acessos pelas barras norte e sul, a jusante, e Caminha.

Tabela 3.5 – Observações de correntes de maré com equipamentos fixos (LNEC, 2007).

Local	Velocidade da corrente (m/s)		Período (dias)	Referência
	Valor máximo	Valor médio		
Embocadura	1,9	0,6	21	CEDEX (2004)
Sector inferior*	1,9	0,4	21	CEDEX (2004)
Caminha-Pasaxe	0,7	0,3	6	CEDEX (2004)
Cerveira-Goian	0,7	0,3	6	CEDEX (2004)

\*entre o ponto onde convergem os acessos pelas barras norte e sul, a jusante, e Caminha.

No projecto ECOIS foram medidas as correntes em duas localidades, em Seixas e na Barra do Minho, nas campanhas já referidas. Na campanha de Verão (Setembro/Outubro 2005), Santos *et al.* (2006), verificaram que as vazantes são mais longas quer nas marés vivas, quer nas marés mortas. Por outro lado, Zacarias (2007), apresenta outra conclusão dos dados recolhidos. Segundo este autor as enchentes são mais longas em marés mortas mas já nas marés vivas são as vazantes. No entanto, os dois estão de acordo em que as enchentes são mais intensas que as vazantes.

Em Seixas, o fluxo faz-se preferencialmente à superfície devido ao facto de as células mais profundas apresentarem menor velocidade que as menos profundas. Na Barra do Minho isso também acontece mas só para maiores amplitudes de maré, porque em marés mortas a velocidade máxima ocorre a meio da coluna de água em enchente. Na vazante os valores máximos ocorrem no fundo (Zacarias, 2007).

Na campanha de Fevereiro/Março o caudal foi muito mais elevado do que na campanha anterior. Constatou-se que as vazantes são muito mais prolongadas do que as enchentes para os dois locais estudados. Devido ao elevado caudal fluvial em Seixas, durante as marés mortas, o fluxo nas células mais à superfície tem velocidades maiores para as vazantes. Nas enchentes ocorre em toda a coluna de água (Zacarias, 2007).

Foi também observado, em ambos os locais e em ambas as campanhas que o momento de inversão da corrente ocorre logo após a preia-mar e a baixa-mar. Contudo, em Seixas, na campanha de Fevereiro/Março, tal já não se verifica quando a corrente inverte de montante para jusante, visto que ocorre em período de preia-mar (Zacarias, 2007).

Com esta análise, conclui-se que o aumento do caudal fluvial altera o comportamento da corrente nos locais observados, sendo essa alteração mais evidente nos locais mais a montante. Ainda assim, é de

referir que a corrente tem uma variabilidade dominada pela maré, mesmo em Seixas com um caudal elevado (Zacarias, 2007).

Segundo este autor a corrente possui uma direcção média de variabilidade de acordo com a direcção principal do estuário.

### 3.2.7 SALINIDADE/TEMPERATURA

A distribuição de salinidade depende da advecção de água doce proveniente do rio e da mistura com a água oceânica promovida pela oscilação da maré.

No estuário do rio Minho, a salinidade apresenta uma variação semi-diurna, o que está, como é óbvio, em concordância com a variação da maré (Zacarias, 2007).

Como seria de esperar, os dados recolhidos confirmam que em época de maior caudal fluvial a intrusão salina é menor que em épocas de menor caudal fluvial.

Durante a vazante na campanha de Verão, a água oceânica faz-se sentir na embocadura do estuário. Durante a enchente, esta faz-se sentir com o mesmo elevado grau de salinidade até 5km, para o interior do estuário, nas marés mortas, sendo que, nas marés vivas, pode ir até 6km, (Santos *et al.*, 2009).

São Pedro da Torre foi o local mais a montante onde se recolheram dados de salinidade, não se detectando salinidade em grande parte da série. Esta foi perceptível com um valor muito baixo, durante as marés vivas e na campanha de Verão (2005).

Durante a campanha de Inverno, na embocadura, pôde observar-se um grau de salinidade nulo, devido ao elevado caudal (Zacarias, 2007).

Relativamente à temperatura, na campanha de Verão, verificou-se uma variação semi-diurna, inversa à da maré, na Barra do Minho e em Seixas. Quando a maré está a encher a temperatura diminui e vice-versa, isto porque no Verão, a água do mar é mais fria do que a água doce correspondente ao caudal fluvial.

Na campanha de Inverno a Barra tem uma oscilação semi-diurna. Em Seixas tal só ocorre nas marés vivas, porque nas marés mortas, existe fraca oscilação diurna. Em São Pedro da Torre a temperatura apresenta uma variação média de 0,5°C para as duas campanhas (Zacarias, 2007).

Em termos de conclusão, pode dizer-se que na 1ª campanha (Verão) o forçamento dominante correspondia à maré que domina claramente o comportamento da salinidade e temperatura até Seixas. Mesmo em São Pedro da Torre a maré faz sentir a sua influência na salinidade. Para a segunda campanha, em toda a série, a maré domina a barra do Minho. Para locais mais a montante só se faz sentir em marés vivas e até Seixas. Nos períodos restantes é o caudal fluvial que domina.

### 3.3. DINÂMICA SEDIMENTAR

A geomorfologia e geologia do rio Minho pode dividir-se em três zonas com rochas intensamente metamorizadas. A zona a montante, rochosa, caracterizada por depressões de fundos largos, que alternam com escarpas abruptas cobertas de mato e de afloramentos rochosos. A zona de transição entre Monção e Valença onde começam a surgir deposições de matéria em suspensão e correntes lentas, dando origem ao aparecimento de ilhas e praias nas margens. Finalmente a zona inferior que

apresenta maiores deposições e correntes muito lentas, dá origem a deposições de areias com formação de bancos (Instituto da Água, 2000).

### 3.3.1 GRANULOMETRIA DOS SEDIMENTOS

A granulometria dos sedimentos do estuário do rio Minho tem sido estudada ao longo do tempo, tanto por Portugal como por Espanha.

Balsinha *et al.* (2009) apresentaram os resultados da análise granulométrica de 72 amostras de sedimentos do fundo, recolhidas ao longo de todo o estuário. Esse estudo foi também realizado no âmbito do programa ECOIS. Segundo este autor, o rio Minho é essencialmente arenoso e tem sedimentos com uma dimensão modal de 0,59mm, sendo caracterizado por areia cujas dimensões variam entre valores médios a muito finos. A montante caracteriza-se por ser mal graduado, enquanto que na embocadura, apresenta-se moderadamente bem graduado. Na parte intermédia apresenta uma grande diversidade de dimensões, caracterizado por areias grossas até muito finas, e desde muito mal graduadas até razoavelmente graduadas.

Tabela 3.6 – Composição granulométrica dos sedimentos do fundo (Balsinha *et al.*, 2009)

	Seixo (%)	Areia (%)	Silte e Argila (%)
Média	6,20	85,67	8,14
Máximo	50,12	100,00	69,93
Mínimo	0,01	21,67	0,48

O esquema de classificação proposto por Folk (1974), referido por Balsinha *et al.* (2009) foi usado para classificar os sedimentos (figura 3.8). A sua avaliação consiste num diagrama triangular (Figura 3.6) onde estão representados o cascalho/seixo (>2,0mm), a areia (2,00mm até 0,063mm) e o silte/argila (<0,063mm).

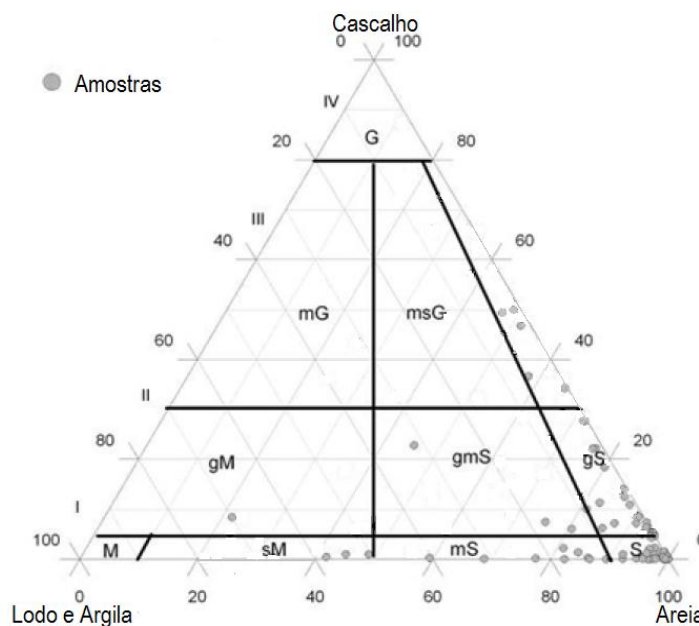


Fig.3.8 – Classificação dos sedimentos segundo o esquema proposto por Folk (1974) (Balsinha *et al.*, 2009).

No rio Minho, o depósito de sedimentos e a sua distribuição podem ser separados em dois sectores distintos, como demonstra a figura 3.9. O primeiro, correspondente à parte mais a montante do estuário até Vila Nova de Cerveira, é essencialmente composto por areia cascalhosa (gS). O segundo, desde Vila Nova de Cerveira até à embocadura, onde o principal componente é a areia (S). Neste último sector, é possível identificar outros depósitos, tais como areia cascalhosa (gS), próximo de Lanhelas, relacionado com o rio Coura e também depósitos mais finos como lodo arenoso (sM) e areia lodosa (mS).

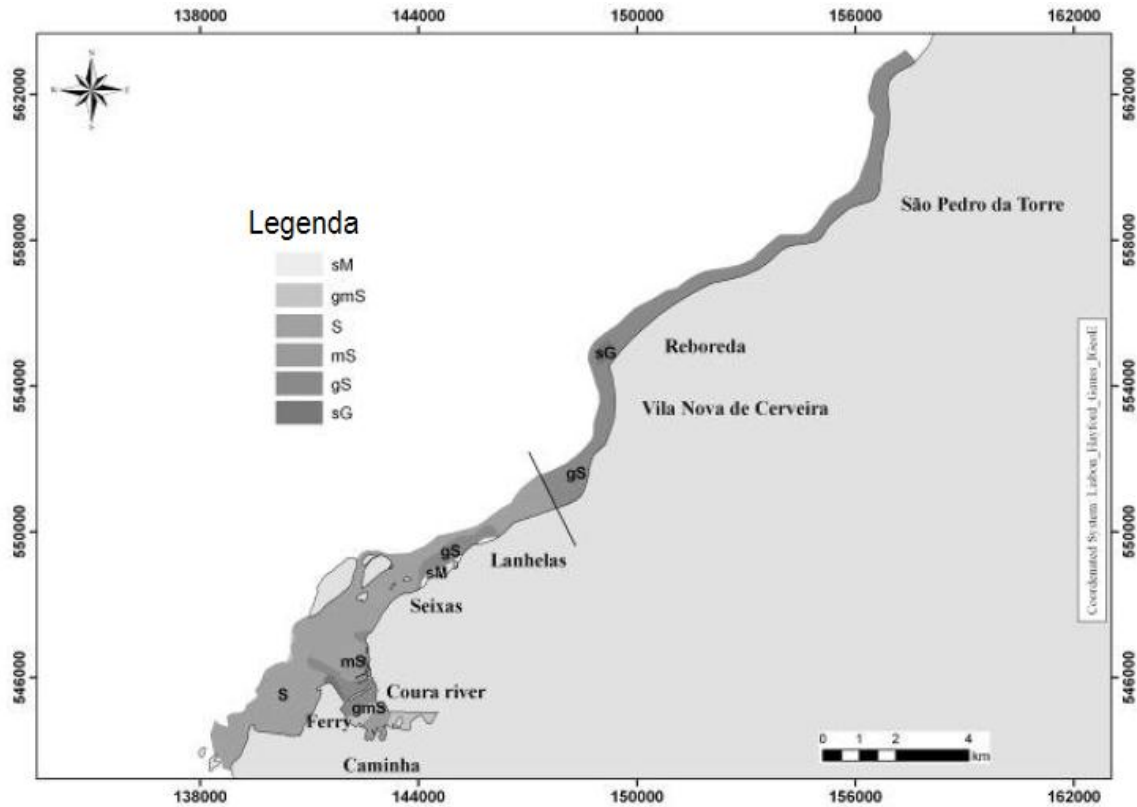


Fig.3.9 – Distribuição sedimentar ao longo do estuário do Minho (Balsinha *et al.*, 2009).

Outro estudo realizado aos sedimentos do fundo, CEDEX (2004), conclui que os sedimentos são constituídos essencialmente por areias médias e grossas de origem terrestre.

Tabela 3.7 – Composição granulométrica dos sedimentos do fundo (CEDEX, 2004 retirado de LNEC, 2007).

	Seixo (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila(%)
Média	3,70	92,10	4,10	0,20
Máximo	31,30	98,50	18,50	1,50
Mínimo	0,10	68,10	0,20	0,00

Tabela 3.8 – Diâmetro característico dos sedimentos (fracção &gt;0,062 mm) na secção Caminha-Pasaxe (CEDEX, 2004 retirado de LNEC, 2007).

Amostra	$D_{84}$ (mm)	$D_{50}$ (mm)	$D_{16}$ (mm)
3	0,64	0,37	0,17
4	0,68	0,42	0,30
5	0,72	0,50	0,37
6	0,94	0,60	0,40
7	0,85	0,52	0,32
8	0,66	0,46	0,33

Alves (1996) apresenta resultados de estudos realizados aos sedimentos superficiais, concluindo que estes têm uma elevada homogeneidade, sendo composto por areias, com um diâmetro mediano  $D_{50}$  entre 0,25 e 1,0 mm. A fracção de seixos (>2 mm) é sempre inferior a 20%. A fracção silto-argilosa (<0,062mm) é sempre inferior a 2%, e frequentemente inferior a 0,2%. Este estudo foi efectuado apenas numa extensão de cerca de 10 km entre a embocadura e Vila Nova de Cerveira (LNEC, 2007).

### 3.3.2 EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA

As condições de navegabilidade dos rios Portugueses sofreram ao longo dos séculos profundas alterações, com especial incidência no estreitamento e no assoreamento dos leitos dos seus canais navegáveis, e o rio Minho não foi excepção (Gil, 2009).

O porto fluvial de Valença manteve-se activo durante o período medieval, contudo, com o assoreamento do leito do rio no século XIX, a navegação para montante desta cidade já só foi praticável, com condicionalismos, apenas por embarcações de pequeno porte. Actualmente a navegação faz-se desde a foz até Valença-Tuy, para montante é apenas navegável por pequenas embarcações, até Monção (Gil, 2008).

Na embocadura, o porto de Caminha tinha antigamente uma maior profundidade e era mais bem transitável (LNEC, 2007).

É importante referir que os problemas devido ao assoreamento já eram observados, antes do período de construção das barragens. A construção de barragens, açudes, o desvio de águas, entre outras intervenções humanas deram origem a alterações morfológicas. Por exemplo, as praias de Camposancos e de Molino, na margem espanhola e também na zona costeira a sul da embocadura, têm evidenciado um processo erosivo. Admite-se que pode estar relacionado com as dragagens realizadas nas regiões de Caminha e Camposancos, de modo a tornar possível a navegação do ferry, e com a exploração de inertes para comercialização (Reis, 2007).

### 3.3.2.1 Extracção de Inertes

Entende-se por extracção de inertes a intervenção de desassoreamento das zonas de escoamento e de expansão das águas de superfície, bem como da faixa costeira, da qual resulte retirada de materiais, tais como areia, areão, godó e cascalho.

A extracção de materiais inertes das zonas de escoamento e expansão das águas nos troços internacionais dos rios obedece às normas estabelecidas entre as autoridades portuguesas e espanholas. No trecho internacional do rio Minho encontra-se suspensa pelas autoridades dos dois países desde 1 de Março de 1989 (LNEC, 2007).

Do lado espanhol, a actividade vinha sendo realizada desde 1959, com um incremento assinalável a partir de 1973. Do lado português, a situação era semelhante, embora o número de explorações e os volumes de extracção fossem menores. Em meados da década de 80, segundo um estudo da Xunta de Galicia (1985), o volume anual de extracção de areias no estuário seria da ordem de 500 000 m<sup>3</sup>. Estavam envolvidas na actividade 16 embarcações espanholas e 3 embarcações portuguesas, existindo 6 locais de depósito na margem espanhola e 2 na margem portuguesa (LNEC, 2007).

O controlo da actividade era deficiente. Embora a extracção pudesse ser vantajosa para a navegabilidade do rio, condicionava a pesca e tinha impactos negativos no ecossistema, Ponte Iglesias (1990) mencionado por LNEC (2007). Todavia, em 1987, as autoridades portuguesas relacionaram a erosão produzida na ilha da Boega com a extracção de areia efectuada junto à margem norte da ilha por embarcações espanholas, CIL (1987), referido por LNEC (2007).

### 3.3.2.2 Dragagens

No início do anos 90, os municípios de Caminha (Portugal) e de A Guarda (Espanha) começaram a estudar seriamente a possibilidade de estabelecer uma ligação por *ferry-boat* entre ambas as localidades. Após uma série de reuniões dirigidos pelos Governos Cívicos de Viana do Castelo e Pontevedra, foi concedida a autorização para a realização das obras. Ao longo de 1993 e 1994 ocorreram os trabalhos de dragagem do canal, e em 28 de Julho de 1994 realizou-se a recepção provisória (Universidade de Cantabria, 1996).

O canal de navegação estabelecido entre as povoações de Caminha e de O Pasaxe, para a operação do *ferry-boat*, situa-se transversalmente ao fluxo do rio e das marés (figura 3.10). Desta maneira, o canal dragado comporta-se como uma armadilha artificial de sedimentos, requerendo portanto uma manutenção sistemática (Universidade de Cantabria, 1996).

O canal tem fundos à cota -2,0m (ZH), ou seja, 4,0 m abaixo do nível médio do mar (NMM), tendo cerca de 100m de largura e 1400m de extensão. Foi estimado um volume da primeira dragagem de estabelecimento com base nos levantamentos de 1991 e 1994, em cerca de 300 000m<sup>3</sup> (LNEC, 2007). Durante 1995, as actividades de manutenção de dragagem foram superiores a 100 000m<sup>3</sup> (Universidade de Cantabria, 1996). Entre 1995 e 2006 foram efectuadas cerca de uma dezena de intervenções de dragagem de manutenção. Em média, foram dragadas em cada intervenção cerca de 60 000 m<sup>3</sup>. Por conseguinte, admite-se que, no total, até essa data foram removidos cerca de 600 000 m<sup>3</sup> de areia (LNEC, 2007).



Fig.3.10 – Localização das dragagens no canal e no acesso ao cais de Caminha (imagem do earth.google.com complementada com informação do LNEC, 2007).

Entretanto, terá sido ponderada a utilização dos dragados para a alimentação da praia de Moledo, mas foi considerado que não teria qualidade para esse fim. No entanto, desde o início das dragagens até meados de 2007, terão sido aplicados na recarga de praias espanholas cerca de 50 000m<sup>3</sup> de areia (LNEC, 2007). Posteriormente a essa data não foi possível a recolha de mais dados.

A figura 3.11 e a figura 3.12, LNEC (2007), representam vários perfis transversais do canal de navegação do *ferry-boat* antes e após as dragagens. Da observação desta figura, facilmente se verifica, uma diminuição do nível médio do perfil transversal depois do início das dragagens.

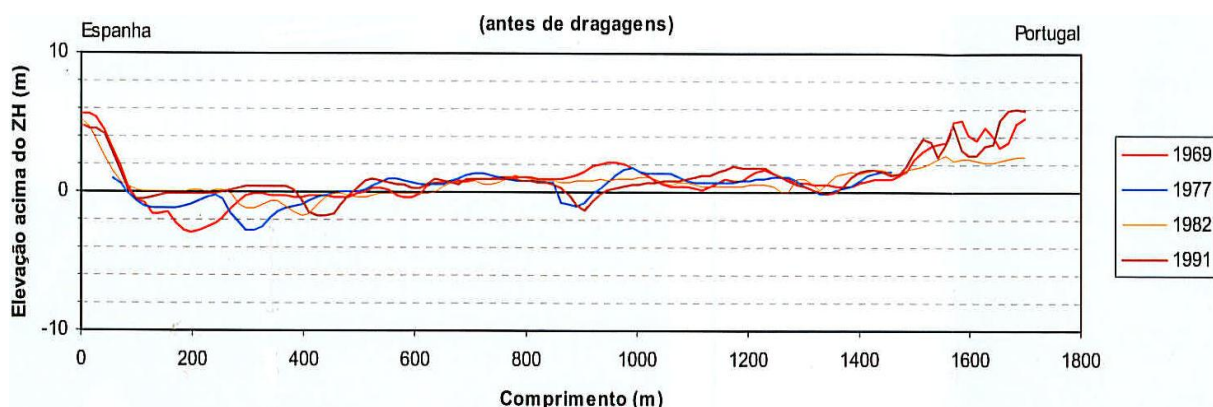


Fig.3.11 – Evolução do perfil transversal do canal de navegação do *ferry-boat* antes do início das dragagens (LNEC, 2007).

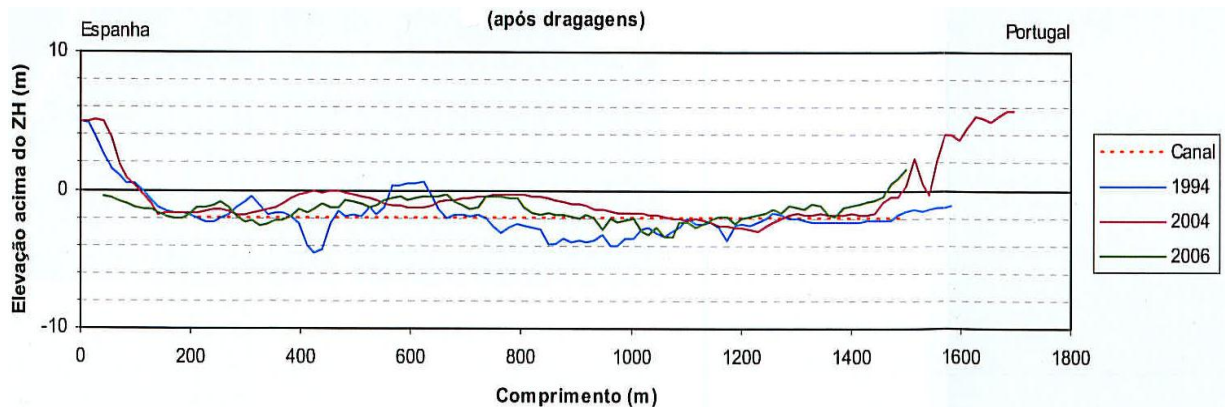


Fig.3.12 – Evolução do perfil transversal do canal de navegação do *ferry-boat* após o início das dragagens (LNEC, 2007).

Durante cerca de dez anos, foi o Município de Caminha quem, no fundamental, se responsabilizou pelo financiamento das dragagens efectuadas, permitindo manter a ligação entre as duas margens do rio Minho. A partir de 2008, e após o estabelecimento de um protocolo entre o Governo Civil de Viana do Castelo e o Governo da Galiza, passou a ser a parte espanhola a responsabilizar-se pelo desassoreamento do canal do *ferry-boat*. Entretanto, em 2010, cerca de dois anos depois, as autoridades espanholas terão, porém, anunciado não estarem mais interessadas na manutenção do canal, alegando que isso implicava elevados custos (cerca de dois milhões de euros entre 2008 e 2010, já que em Espanha a legislação vigente obriga a que toda a areia dragada seja reposta nas praias, o que não sucede com a legislação em Portugal, que permite que dois terços do volume de inertes dragados sejam comercializados).

Perante a ausência de qualquer manutenção, o canal está a ficar progressivamente assoreado e os problemas de circulação do *ferry-boat* começam a ser cada vez mais difíceis de superar. No início do verão de 2010, o assoreamento do canal já punha em risco a navegabilidade do *ferry*. A situação de assoreamento agravou-se meses mais tarde, causando inclusivamente o encalhamento do *ferry* por mais de uma hora, com diversos passageiros retidos no interior da embarcação. Aliás, se os trabalhos de dragagem continuarem interrompidos, terá que ser encerrada a ligação entre Caminha e La Guardia, a mais antiga fronteira do rio Minho unindo os dois maiores centros populacionais das duas margens do rio.

Segundo o que se julga saber, até à data não foram retomada a actividade das dragagens e mantêm-se os processos burocráticos nas diversas entidades responsáveis para a tentativa da retoma dos trabalhos.

Em 2004-2005, o INAG promoveu a dragagem de um canal de acesso à ponte-cais e aos estaleiros de Caminha, como demonstra a figura 3.11. Segundo dados recolhidos pelo LNEC (2007), o acesso à ponte-cais teria uma dimensão de 50m de largura por 850 de extensão, e o acesso aos estaleiros uma largura de 20m e uma extensão de 200m, tendo ambas as dragagens, sido executadas à cota -1,0m (ZH), ou seja 3,0m abaixo do NMM. O volume de dragagem foi estimado em cerca de 75 000m<sup>3</sup>.

Contudo, existem referências a dragagens mais antigas, relativamente às quais, não foi possível recolher informação.

No entanto, esta actividade nunca foi pacífica, e foi sempre um alvo de protesto por parte dos ambientalistas, que advogam que as dragagens constituem um factor de enorme perturbação das comunidades animais e vegetais.

### 3.3.2.3 Evolução Morfosedimentar

Embora seja um estuário relativamente pouco investigado, a existência de algumas informação de base da segunda metade do século XIX, incluindo trabalhos da Comissão Internacional de Limites entre Portugal e Espanha, permite tirar conclusões sobre a sua evolução antes e após a realização de diversas intervenções na bacia hidrográfica e no próprio estuário. Verifica-se que o elevado preenchimento sedimentar do estuário não é um fenómeno recente e que se traduz pela elevada percentagem de área situada acima do ZH (cerca de 70%). Verifica-se também que o sector inferior do estuário está sujeito a um processo contínuo de evolução morfológica, eventualmente cíclico, ao longo de várias décadas, que deve ser tido em consideração na apreciação dos problemas de assoreamento e na sua gestão do estuário (Portela, 2011).

Alguns estudo realizados anteriormente tiveram como objectivo, entre outro, de analisar a evolução morfológica do estuário do rio Minho. Assim, através da comparação dos levantamentos hidrográficos, efectuou-se a determinação de áreas de assoreamento e erosão e o cálculo dos respectivos volumes.

Consulmar (1990) efectuou auma comparação entre os levantamentos de 1969 e 1982, onde o balanço final foi favorável para o assoreamento com um saldo na ordem de 550 000m<sup>3</sup>. Representa, portanto, 42 000 m<sup>3</sup>/ano; que significa uma subida média anual dos fundos de 0,10m em 13 anos (LNEC, 2007).

CEDEX (2004) também comparou dois levantamentos espanhóis de 1991 e de 2004, numa área mais extensa, tendo sido estimada uma perda de volume de 1 800 000m<sup>3</sup> no período de 13 anos, ou seja, 130 000 m<sup>3</sup>/ano. Esta evolução, de sentido contrário da anterior, foi relacionada com as dragagens no canal do ferry (LNEC, 2007).

O LNEC (2007) implementou o mesmo processo, recorrendo a mais levantamentos que abrangem um intervalo de tempo maior. Os levantamentos estudados cobrem diferentes áreas, existindo cinco levantamentos detalhados do sector inferior, entre Caminha e a embocadura (1969, 1977, 1982, 2004 e 2006) e três do sector médio (1986, 2004 e 2006), entre Vila Nova de Cerveira e Caminha. A zona exterior entre o Cabedelo e a Ínsua encontra-se representada, ainda que de forma desigual, nos levantamentos de 1969, 1977, 1982 e 2004. Os resultado foram os seguintes:

- **Volume de assoreamento e erosão no estuário médio**

A análise deste sector apresentou dificuldades, devido à incerteza acerca do nível de referência do levantamento de 2004 e a reduzida informação topográfica do levantamento de 2006. Foi necessário estabelecer uma relação entre o Zero Hidrográfico e o nível de referência em Espanha para o levantamento de 2004. Assim, um critério possível foi admitir a estabilidade na topografia das ilhas, corrigindo-se em todo o levantamento a diferença de cotas registada nessas ilhas. A análise topográfica indicou que a diferença entre os levantamentos de 2004 e 1986, para cada ilha, era em média de -0,93m. Comparando também toda a área comum, abrangendo topografia e hidrografia, foi obtida a mesma diferença média de -0,93m. Desta forma o levantamento foi ajustado adoptando este valor.

Após o ajuste verifica-se que, durante 1986 a 2004, existiu um equilíbrio global mas que no entanto não impediu que se verificassem, simultaneamente, zonas de erosão e de assoreamento, correspondente a milhões de m<sup>3</sup>. A comparação dos levantamentos de 1986 e 2006, limitada à hidrografia e com uma área comum bastante menor, revela alterações morfológicas concordantes com as observadas entre 1986 e 2004.

Em suma, os levantamentos do sector médio do estuário, de 1986, 2004 e 2006, são coerentes entre si relativamente ao padrão de alterações morfológicas registado. Porém, não são concordantes quanto à tendência global do sistema. Com base nos dados de 1986 e 2004, a análise separada da topografia e da hidrografia sugere que este sector do estuário se poderia encontrar numa situação de estabilidade. A comparação de 1986 e 2006 sugere uma tendência de erosão.(tabela 3.9).

Tabela 3.9 – Comparação de levantamentos do sector médio do estuário: volume de erosão e de sedimentação entre 1986 e 2006 e também entre 1986 e 2004 após ajuste do nível de referência do levantamento de 2004 em 0,93m (adaptado de LNEC, 2007).

	Área Comum (km <sup>2</sup> )	Erosão (m <sup>3</sup> )	Sedimentação (m <sup>3</sup> )	Total (m <sup>3</sup> )
1986 +0,93m a 2004	11,4	-4 390 000	4 390 000	0
1986 a 2006	7,9	-6 180 000	2 390 000	-3 790 000

#### ▪ Volumes de assoreamento e erosão no estuário inferior

Neste sector do estuário importa reter a incerteza sobre o nível de referência em 2004 e que também as dragagens no canal do *ferry* se iniciaram em 1994.

Os levantamentos de 1969, 1977 e 1982 são coerentes entre si, com uma tendência global do sistema, neste período, de assoreamento moderado. Entre os levantamentos de 1982 e 2004 obteve-se uma clara propensão à erosão com uma diferença média de -0,96m, valor próximo do registado no sector médio do estuário entre 1986 e 2004. Já entre os levantamentos de 1982 e 2006, registou-se uma diferença média de -0,36m, correspondente a uma aparente erosão. Este valor está também próximo do que foi registado no sector médio do estuário entre 1986 e 2006 (-0,41m). A tabela seguinte apresenta o resumo global dos volumes de erosão e de sedimentação no sector inferior do estuário.

Tabela 3.10 – Comparação de levantamentos do sector inferior do estuário: volumes de erosão e de sedimentação (LNEC, 2007).

	Área Comum (km <sup>2</sup> )	Erosão (m <sup>3</sup> )	Sedimentação (m <sup>3</sup> )	Total (m <sup>3</sup> )
1969 a 1977	4,4	-1 350 000	1 700 000	350 000
1977 a 1982	4,4	-1 550 000	2 110 000	560 000
1969 a 1982	5,2	-2 060 000	2 900 000	840 000
1982 a 2004	5,2	-6 540 000	1 200 000	-5 340 000
2004 a 2006	4,8	-360 000	3 720 000	3 360 000
1982 a 2006	4,8	-4 080 000	2 260 000	-1 820 000

O levantamento de 2004 deve ser analisado com alguma cautela, porque não foi possível estabelecer uma relação formal com o Zero Hidrográfico. Contudo, analisando os resultados, ignorando o levantamento de 2004, o levantamento de 2006 revela um comportamento contrário aos levantamentos anteriores, tal como sucede no sector médio do estuário. Portanto estes levantamentos levam às mesmas questões que se colocaram em relação ao sector médio do estuário, existindo coerência entre ambos os sectores.

▪ **Volume de assoreamento e erosão na zona exterior**

Neste sector foram analisados 4 levantamentos diferentes que, no entanto, compreendem uma área comum relativamente pequena. É uma zona naturalmente sujeita a variações morfológicas sazonais e anuais em função do regime de agitação marítima e do caudal fluvial, pelo que a interpretação das variações volumétricas deve ser particularmente prudente.

Entre 1969, 1977 e 1982, obteve-se uma tendência constante de assoreamento, conforme se tinha obtido no sector inferior do estuário. Entre 1982 e 2004, verifica-se uma descida do nível médio, reflectindo uma aparente erosão, como demonstra a tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Comparação de levantamentos da zona exterior: volumes de erosão e de sedimentação (LNEC, 2007).

	Área Comum (km <sup>2</sup> )	Erosão (m <sup>3</sup> )	Sedimentação (m <sup>3</sup> )	Total (m <sup>3</sup> )
1969 a 1977	0,7	-180 000	370 000	190 000
1977 a 1982	1,1	-520 000	640 000	120 000
1969 a 1982	1,1	-320 000	790 000	470 000
1982 a 2004	1,6	-1 930 000	90 000	-1 840 000

Com o intuito de analisar as características gerais e a variabilidade das áreas emersas da embocadura recorreu-se a fotografias aéreas. Na figura 3.13 é apresentado um conjunto de fotografias aéreas de 1958 a 1995, do Instituto Geográfico do Exército e do Instituto Geográfico Português retiradas de LNEC (2007). Para complementar a análise recorreu-se a imagens disponíveis na internet desde os anos de 2001 até 2010 ([www.earth.google.com](http://www.earth.google.com)).

O crescimento da restinga para norte é limitada pela acção das correntes de maré e por caudais fluviais elevados. A acção da agitação sobre a Ínsua é responsável pela formação da saliência da Ponta Ruiva, forma intermédia entre a linha de costa rectilínea e o tómbolo, e também a robustez do Camarido reflecte possivelmente a acção protectora da Ínsua (LNEC, 2007).

Na fotografia aérea de 1983, observa-se o tómbolo praticamente contituído na barra portuguesa, formando um arco com convexidade para norte. Segundo Loureiro (1904) a ligação por terra à Ínsua, já foi documentada, e que estaria associada a anos de caudais fluviais baixos quando faltam as cheias para varrer as areias da barra (LNEC, 2007).

Entre as fotografias aéreas mais antigas e as mais recentes, verifica-se que o limite da zona arborizada do pinhal do Camarido (domínio terrestre) se deslocou no sentido da praia, tendo este deslocamento, na Ponta Ruiva, atingido um valor máximo de 250m. Esta expansão da zona arborizada deve ser tida em consideração na análise do emagrecimento das zonas de praia e duna (domínio litoral) de Camarido e Moledo (LNEC, 2007).

Outro aspecto a salientar é o facto de que a restinga sofre variações morfológicas bruscas em curtos espaços de tempo. Por exemplo nas fotografias aéreas de 2001 no espaço de 3 dias verifica-se uma significativa diminuição da sua área, bem como nas fotografias aéreas de 2010 onde na primeira fotografia se depreende que a restinga esta sofrer um processo de erosão.

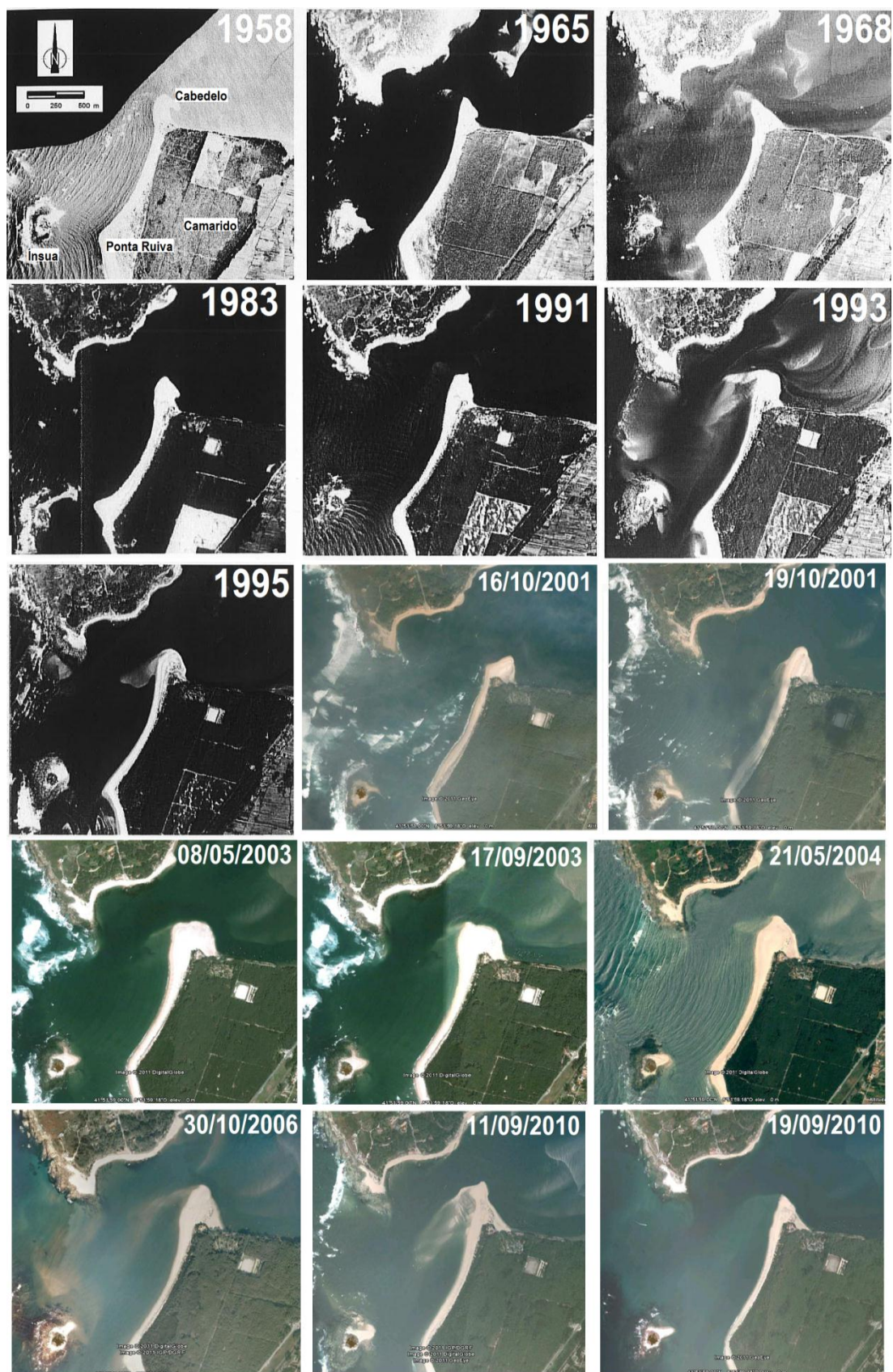


Fig.3.13 – Fotografias aéreas da embocadura do rio Minho entre 1958 e 2010 (Instituto Geográfico do Exército e Instituto Geográfico Português de LNEC, 2007 e [www.earth.google.com](http://www.earth.google.com)).

### 3.4. APROVEITAMENTOS HIDRÁULICOS

#### 3.4.1 APROVEITAMENTOS EXISTENTES

A bacia hidrográfica do rio Minho tem uma grande densidade de aproveitamentos hidroeléctricos na parte espanhola, contabilizando um total de 106 centrais hidroeléctricas (das quais 36 são grandes centrais), fazendo desta região uma das principais regiões produtoras de energia eléctrica em Espanha. Dessas barragens 59 possuem altura superior a 10m e 2.166 açudes com altura compreendida entre 2 a 10m (Plan Hidrológico Miño-Sil, 2010-2015). Estes dados referentes ao Plan Hidrológico Miño-Sil, 2010-2015, engloba a pequena parcela da bacia hidrográfica do rio Lima em território espanhol.

Da vasta bibliografia consultada, apenas foi possível a obtenção de dados relativos ao ano de 1990, referente ao número de barragens na bacia hidrográfica do rio Minho. Portanto, segundo Moura (1990), existe um total de 44 barragens das quais 43 estão situadas em Espanha e 1 em Portugal. Por outro lado, em 2007, LNEC (2007), refere que existem 34 barragens com capacidade de armazenamento superior a  $1 \times 10^6 \text{m}^3$ .

Analisando apenas o percurso do rio Minho, contabilizamos 5 barragens principais (figura 3.14), e todas em território espanhol, respectivamente, de montante para jusante, Belesar, Peares, Velle, Castrelo e Frieira. As últimas três barragens, Velle, Castrelo e Frieira, situam-se a jusante da confluência com o rio Sil e a montante do trecho internacional, apresentando uma capacidade de armazenamento inferior a 5% do total.

A barragem de Belesar é a que tem uma maior capacidade de reserva de água, na bacia hidrográfica do Minho, com um volume próximo dos  $655 \text{hm}^3$ . A barragem de Frieira consiste no aproveitamento hidráulico situado imediatamente a montante do início do troço internacional do rio e que controla directamente o escoamento observado em Foz do Moura. Esta barragem possui uma capacidade muito reduzida de armazenamento, aproximadamente  $44 \text{hm}^3$ , quando comparada com as afluições médias anuais nesta secção, não sendo por isso, possível um controlo da magnitude de cheias observadas neste rio (Instituto da Água, 2000).

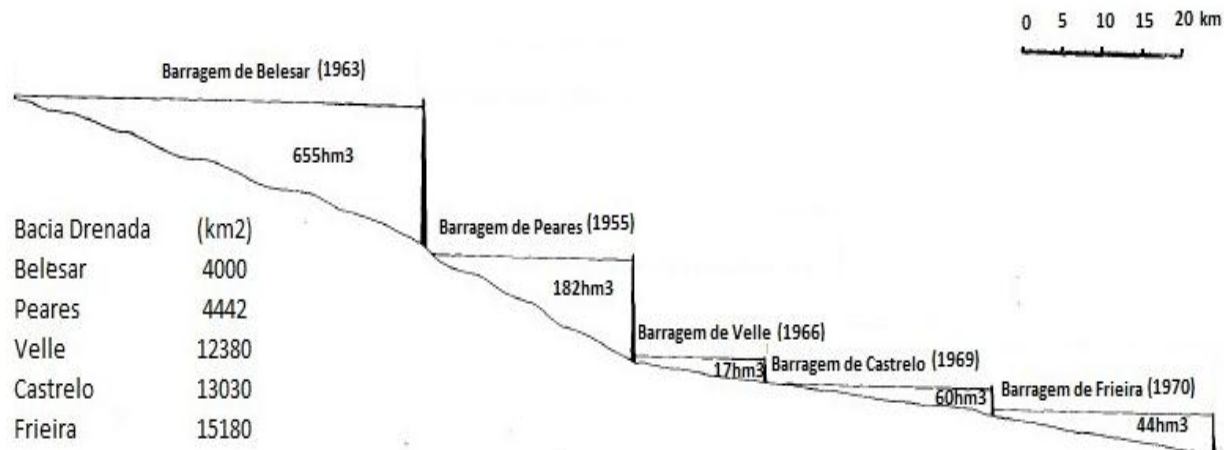


Fig.3.14 – Perfil longitudinal dos aproveitamentos no rio Minho (Yordi *et al.*, 1967) e algumas das suas características (LNEC, 2007) (Confederación Hidrográfica del Miño-Sil (b)).

No entanto, em Espanha, os afluentes do rio Minho possuem também aproveitamentos de grandes dimensões. Na tabela 3.12 apresenta-se por ordem de capacidade de armazenamento as principais barragens existentes nos afluentes do rio Minho.

Tabela 3.12 – Principais barragens da bacia hidrográfica do Minho (Confederación Hidrográfica del Miño-Sil, 2007)

Barragem	Capacidade (hm <sup>3</sup> )	Bacia drenada (km <sup>2</sup> )	Ano de construção	Rio
Las Portas	536	168	1974	Camba
Barcena	342	832	1960	Sil
Bao	238	725	1960	Bibey
San Esteban	214	7143	1955	Sil
Prada	122	256	1958	Xares
Albarellos	91	214	1972	Avia

Em Portugal, os aproveitamentos hidráulicos existentes na bacia do rio Minho resumem-se ao aproveitamento hidroeléctrico de Covas e a aproveitamentos hidroeléctricos de pequena potência (mini-hídricas). A barragem de Covas no rio Coura é de gravidade com uma altura de 10m apresentando uma capacidade de armazenamento de 0,6 hm<sup>3</sup>, tendo como finalidade a produção de energia (Instituto da Água, 2000).

#### 3.4.2 ALTERAÇÃO DO REGIME FLUVIAL

As alterações do regime fluvial no estuário do Minho são difíceis de contabilizar, isto porque a maioria das barragens foram construídas antes de 1973, ano do início da estação hidrométrica de Foz do Mouro. No entanto, é possível quantificar o nível de intervenção humana, através do cálculo da capacidade de armazenamento total das barragens e desvios das águas. Segundo o Plan Hidrológico Miño-Sil (2010-2015), a capacidade total de armazenamento é aproximadamente de 3.000 hm<sup>3</sup> (figura 3.15) e por outro lado contabilizam-se 85 desvios hidroeléctricos com um volume anual de 142,969 hm<sup>3</sup>/ano.

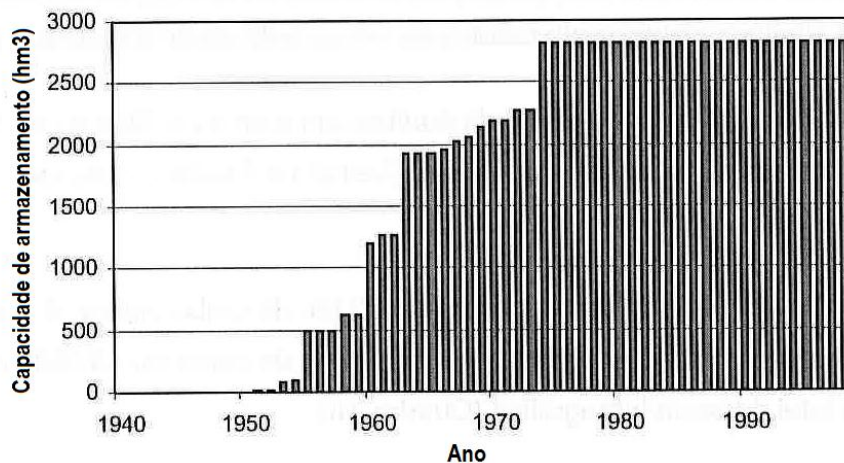


Fig.3.15 – Evolução da capacidade de armazenamento em barragens construídas na parte espanhola da bacia hidrográfica do rio Minho (LNEC, 2007, retirado de CHN, 1998).

### 3.4.3 RETENÇÃO DE SEDIMENTOS EM ALBUFEIRAS

Não existe muita informação relativamente à retenção de sedimentos em albufeiras quer Portuguesas quer Espanholas, sendo relativamente escassa, em particular em relação ao rio Minho. Esta falha é importante pois a ausência de sedimentos na costa, provenientes dos rios, afecta essencialmente as praias Portuguesas, provocando a sua erosão.

No entanto, o LNEC (2007) efectuou uma extrapolação baseando-se na taxa de sedimentação em 15 albufeiras espanholas, situadas noutras bacias. Segundo este estudo, CEDEX (1998), a perda de capacidade dessas 15 albufeiras equivale em média a 5% do volume inicial de armazenamento por século, apesar de grandes variações. Com estes dados o LNEC (2007) admitiu uma perda de capacidade média de 0,05% por ano, que multiplicado pelo volume total de armazenamento de 34 albufeiras ( $2800 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) corresponde à estimativa de retenção nas albufeiras de  $1,4 \times 10^6 \text{ m}^3$  de sedimentos por ano. Concluiu também, que este resultado era compatível com as estimativas de transporte sedimentar no rio Minho apresentadas por Magalhães (2001), segundo as quais o transporte em regime natural, de  $1,7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ , teria diminuído para  $0,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$  após a construção das barragens.

Para uma melhor análise, foi feita uma tentativa de determinar outros valores que, de alguma forma, possam reflectir a situação actual da sedimentação no rio Minho. Porém, este tipo de estimativa deve ser encarada com prudência, face ao tipo de abordagem adoptada.

Tendo como base o estudo efectuado por Lameiro (2009) sobre a sedimentação nas principais albufeiras portuguesas, o qual considerou o volume morto de cada barragem (definido aquando da fase de projecto) como sendo o real volume de sedimentação actual verificado nas albufeiras com 50 ou mais anos de vida, ou seja,

$$\text{Volume}_{\text{Sedimentação}} = \text{Volume}_{\text{Morto}} \quad (3.1)$$

e admitiu para as barragens com um tempo de vida inferior a 50 anos que a sedimentação da albufeira seria directamente proporcional à idade da barragem, isto é,

$$\text{Volume}_{\text{Sedimentação}} = \frac{\text{Volume}_{\text{Morto}}}{50} \times \text{idade}_{\text{Barragem}} \quad (3.2)$$

No entanto, para as albufeiras sem informação relativa ao volume morto, este foi considerado igual à diferença entre a capacidade total e útil da albufeira, informação essa existente na tabela 3.8. No caso do rio Minho a informação relativa ao volume morto não está disponível no inventário do Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de Espanha. Apenas se encontra disponível o volume total e útil para a maior parte das albufeiras, através dos quais foram calculados os volumes mortos.

Com o propósito de colmatar algumas faltas de dados, Lameiro (2009), procedeu de forma similar a Stigter *et al.* (1989) para a estimativa do volume de sedimentos depositados através de uma relação empírica entre a área da bacia hidrográfica e o volume de sedimentos depositados.

Esta relação empírica apenas foi utilizada para o cálculo da albufeira de Peñarrubia no rio Sil. Para determinar a respectiva curva de correlação (Figura 3.16) foram apenas consideradas as albufeiras da província do Ourense numa tentativa de isolar os casos com condições de erosão e transporte de

sedimentos semelhantes. O grau de correlação obtido não é muito próximo da unidade mas, no entanto, considerou-se que a relação estabelecida será suficiente tendo em vista a realização da estimativa pretendida.

Contudo, como demonstra a figura 3.16, existem duas tendências distintas. Uma irá conduzir a um volume de sedimentos depositados muito maior que a outra. Apesar deste comportamento divergente, que não foi possível alterar, não terá grande influência nos resultados finais porque apenas foi calculado através deste método uma barragem e cuja área drenada é relativamente pequena.

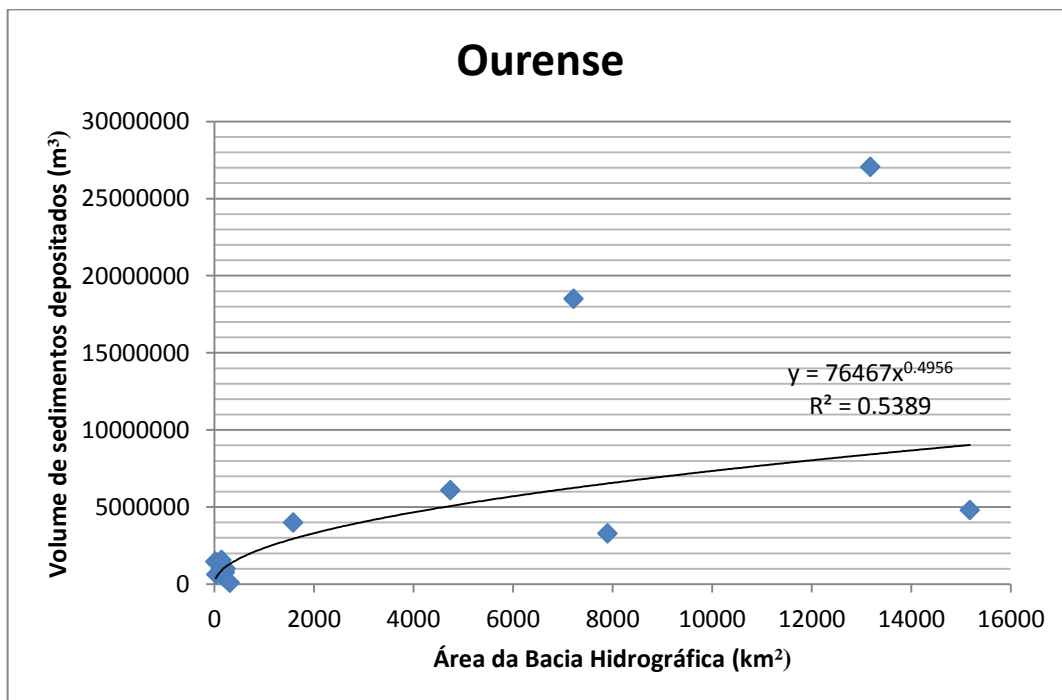


Fig.3.16 – Relação entre o volume de sedimentos depositados e a área da bacia hidrográfica para a província de Ourense.

Nesta estimativa foram analisadas as 28 principais albufeiras da bacia hidrográfica do Minho, que são as que estão referidas na página da internet da Confederación Hidrográfica del Miño-Sil. Estima-se que estas barragens representam um volume total de sedimentos depositado de 285 milhões de m<sup>3</sup> e uma capacidade de 2928 milhões de m<sup>3</sup>, o que significa que 9,7% da capacidade bruta total para o armazenamento de água estará, hoje, ocupada por sedimentos.

Tabela 3.13 – Características das albufeiras analisadas  
(<http://sig.marm.es/snczi/visor.html?herramienta=Presas>).

Albufeiras	Rio	Volume Total (hm <sup>3</sup> )	Volume Útil (hm <sup>3</sup> )	Área Drenada (km <sup>2</sup> )	Idade	Volume morto (hm <sup>3</sup> )	Volume de sedimentação (hm <sup>3</sup> )
<b>LEÓN</b>							
BÁRCENA	SIL	341,50	281,00	832,00	50,00	60,50	60,50
CAMPAÑANA, LA	SIL	14,00	13,00	10,07	47,00	1,00	0,94
MATALAVILLA	VALSECO/SIL	65,00	0,00	58,00	43,00	65,00	55,90
ROZAS, LAS	SIL	28,00	0,00	354,80	42,00	28,00	23,52
<b>LUGO</b>							
BELESAR	MINHO	640,00	606,00	4290,00	47,00	34,00	31,96
PEARES, OS	MINHO	182,00	148,00	4533,00	55,00	34,00	34,00
SEQUEIROS	SIL	11,00	6,00	6143,00	59,00	5,00	5,00
VILASOUTO	MAO-CABE	20,90	20,90	50,25	41,00	0,00	0,00
<b>OURENSE</b>							
ALBARELLOS	AVIA	91,00	90,00	214,00	39,00	1,00	0,78
BAO	BIBEI	238,00	238,00	727,17	50,00	0,00	0,00
CASTRELO	MINHO	66,00	33,00	13180,00	41,00	33,00	27,06
CENZA	CENZA	43,00	38,70	23,80	17,00	4,30	1,46
CHANDREXA	NAVEA	61,00	60,00	151,00	57,00	1,00	1,00
EDRADA/MAO	EDRADA	11,00	10,00	42,50	32,00	1,00	0,64
FRIEIRA	MINHO	44,00	38,00	15178,00	40,00	6,00	4,80
GUÍSTOLAS	NAVEA	5,00	4,00	224,80	58,00	1,00	1,00
MONTEFURADO	BIBEI-SIL	11,00	7,00	1586,60	56,00	4,00	4,00
PEÑARRUBIA	SIL			345,80	28,00	0,00	???
PÍAS (S. Agustín)	BIBEI	8,50	8,00	181,10	49,00	0,50	0,49
PORTAS	CAMBA	536,00	536,00	168,30	36,00	0,00	0,00
PRADA	XARES	122,00	122,00	180,00	52,00	0,00	0,00
S. MARTIÑO	SIL	10,10	4,00	4739,60	54,00	6,10	6,10
S. PEDRO	SIL	5,80	2,50	7899,00	51,00	3,30	3,30
S. SEBASTIÁN	BIBEI	46,00	45,00	130,00	51,00	1,00	1,00
STA. EULALIA	XARES	10,10	10,00	309,20	44,00	0,10	0,09
STO. ESTEVO	SIL	213,50	195,00	7216,00	55,00	18,50	18,50
VELLE	MINHO	17,00	17,00	12530,00	44,00	0,00	0,00
	TOTAL:	2841,40		MÉDIA:	45,85	TOTAL:	283,43

Observa-se que os resultados obtidos não apresentam grande discrepância em relação ao estudo efectuado por Lameiro (2009), o qual obteve 12,5% da capacidade bruta total para o armazenamento de água ocupado por sedimentos, nas albufeiras de Portugal. A tabela 3.14 apresenta a comparação dos restantes dados.

Tabela 3.14 – Comparação do resultado da estimativa com o resultados apresentados por Lameiro (2009) (Informação das áreas retirado do sítio da Associação Portuguesa de Recursos Hídricos).

Região Hidrográfica	Área Total das Bacias (km <sup>2</sup> )	Nº de Albufeiras	Volume de Sedimentos (hm <sup>3</sup> )
Norte	25271	15	268,937
Centro	11478	6	83,622
Tejo	25685	13	481,821
Alentejo	23760	16	394,064
Algarve	5509	3	13,38
Minho-Sil	16282	28	284,99

Apesar da semelhança com o trabalho de Lameiro (2009), estes resultados apresentam grandes divergências em relação às estimativas realizadas pelo LNEC (2007) e por Magalhães (2001).

Para uma comparação plausível converteu-se o volume de sedimentação total para o volume de retenção de sedimentos por ano. Para tal foi necessário dividir o volume total de sedimentação calculado (284,99 hm<sup>3</sup>) com a idade média das barragens (45,61 anos), tendo-se obtido um volume de retenção de sedimentos por ano de  $6,25 \times 10^6 \text{m}^3$ . Este valor representa aproximadamente quatro vezes e meia mais do que a estimativa do LNEC(2007), que tem o valor de  $1,4 \times 10^6 \text{m}^3$  como já tinha sido referido.



## 4

## APLICAÇÃO DO MODELO

## 4.1. DESCRIÇÃO GERAL DO SOFTWARE

Como resultado de melhorias contínuas em *hardwares* e algoritmos de cálculo, as simulações numéricas constituem uma ferramenta cada vez mais importante. Esta área habitualmente designada por “Hidroinformática”, tem-se desenvolvido bastante nos últimos anos, a fim de simular os processos físicos em zonas costeiras e estuários. As simulações numéricas consistem no acoplamento de uma série de módulos, que simulam fenómenos tais como ondas e correntes de propagação, transporte de sedimentos e desenvolvimento da morfologia do leito. Estes módulos estão associados entre si uma vez que incluem um grande número de processos e mecanismos que agem e interagem num determinado espaço e ao longo do tempo.

Neste capítulo é apresentado o software de modelação hidrodinâmica TELEMAC ([www.telemacsystem.com](http://www.telemacsystem.com)), o qual já foi utilizado em diversos estudos em todo o mundo (várias centenas), tornando-se uma das principais referências na área da hidráulica.

Entre os actuais sistemas de modelação numérica, o TELEMAC é uma ferramenta que inclui sistemas para a modelação da hidrodinâmica da superfícies livre, sedimentologia, qualidade da água, ondas e fluxo de águas subterrâneas.

O modelo foi inicialmente desenvolvido em França, pelo *Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE)*, um departamento de pesquisa da companhia *Electricité de France (EDF)*, e é distribuído pelo SOGREAH. Está validado em conformidade com as recomendações da *International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR)* (Hervouet e Bates, 2000). A sua evolução tem sido efectuada através da junção de esforços de várias equipas de investigadores na Europa, das quais as primeiras foram as Universidade de Hannover na Alemanha, Bristol em Inglaterra e Coimbra em Portugal (Hervouet, 2000).

Os vários módulos de simulação do sistema TELEMAC emprega poderosos algoritmos baseados em elementos finitos ou métodos de volumes finitos. Utiliza uma malha completamente flexível de formas triangulares (figura 4.1), e como esta é não estruturada, pode representar a costa e outros elementos complexos de forma muito precisa (Hervouet, 2000; Hervouet e Bates, 2000).

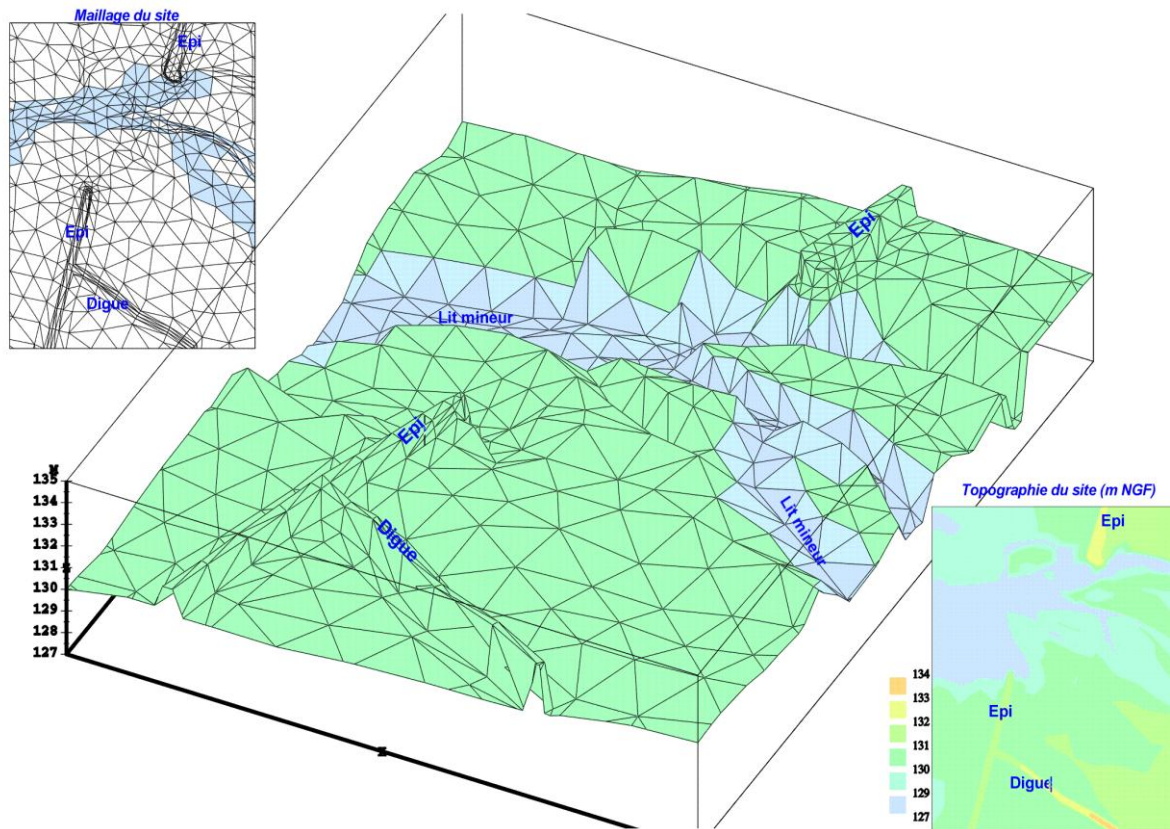


Fig.4.1 – Exemplo da malha de um rio e de um dique (Mensencal, sem data).

O vértice de cada triângulo é um local de cálculo caracterizado pelas suas referências planimétricas (X, Y) e altimétricas (Z) e por um coeficiente de rugosidade representando o estado local da superfície do terreno (Mensencal, sem data).

O método de elementos finitos em que o TELEMAC se baseia, associado a uma malha de cálculo, composta por elementos triangulares de diversos tamanhos e formas, permite que a topografia seja discriminada de forma adequada e, portanto, as geometrias complexas da área de estudo (aterros, leito de rios sinuosos, ilhas, estruturas, estradas, ruas, afluentes secundários, etc) podem ser tidas em conta. A malha pode ser executada de forma mais densa e, portanto, os resultados produzidos pelo modelo são mais refinados em áreas de interesse especial, como em torno das estruturas de descarga, pilares de pontes e zonas sensíveis (Mensencal, sem data).

#### 4.1.1 AS PRINCIPAIS APLICAÇÕES DO SISTEMA TELEMAC

As principais aplicações do *software* são as seguintes (Mensencal, sem data):

- Roturas de barragens e diques;
- Estudo de cheias;
- Estudo de instalações de portos (estruturas, molhes, quebra-mares, etc);
- Impacto de estruturas hidráulicas (pontes, aterros, etc);
- Gestão e desenvolvimento de estuários;
- Qualidade da água (descargas das estações de tratamento, descargas industriais, etc);

- Recirculação térmica;
- Descarga de materiais dragados;
- Estudos hidrosedimentares;
- Perturbações de ondas num porto ou baía;

No contexto desta tese, o importante diz respeito à modelação de estuários, que, no entanto, abrange um grande número de aplicações devido a estes ambientes costeiros serem ricos no desenvolvimento e interacção física de fenómenos. As condições de morfologia e hidrodinâmica são extremamente variáveis e os processos hidrosedimentares tal como os mecanismos ecológicos são particularmente significantes.

Portanto, de uma forma geral o sistema TELEMAC pode ser aplicado aos estuários, em matérias como, a análise das mudanças e desenvolvimento do leito dos rios, as áreas com tendência para a deposição de sedimentos e a sua espessura, representando uma análise de cariz sedimentológica. Também pode ser feita uma análise aos vários fenómenos de interacção entre o rio e o oceano como a zona máxima de turbidez, a cunha salina, entre outros e os impactos hidrodinâmicos e ambientais durante as dragagens para a construção de um porto ou trabalhos de aprofundamento de um canal, ou durante o desenvolvimento de estruturas (novos portos, quebra-mares de protecção, ilhas artificiais, etc.). Contudo, se se pretender efectuar um análise no contexto da qualidade da água, pode ser representada a “nuvem” turva gerada por obras de dragagem ou descargas de estações de tratamento. Pode também ser estudado as áreas de descarga mais adequadas, com base numa análise de equilíbrio entre os custos de implantação e a protecção do ambiente (áreas de reprodução de marisco, águas balneares, áreas sensíveis, etc.). Por fim também é possível efectuar uma avaliação do tempo de renovação da água numa marina ou numa bacia. Apesar da separação dos diferentes campos que podem ser analisados, todos eles possuem uma grande interligação entre si.

#### 4.1.2 ESTRUTURA DO SISTEMA

Classicamente, é constituído por pré-processadores para digitalizar os dados e descrever o problema, por programas de simulações e por pós-processadores para exibir os dados e analisar os resultados. A estrutura do sistema, apresenta os seguintes módulos (Mensencal, sem data):

- **Pre-processor**
  - MATISSE – *software* concebido para gerar uma malha composta por elementos triangulares, utilizando dados batimétricos e/ou topográficos;
  - FUDAA-PREPRO – interface do utilizador;
  - STBTEL – adaptação para programas geradores de malha comerciais existentes;
- **Hidrodinâmica**
  - TELEMAC-2D – *software* desenvolvido para realizar simulações hidrodinâmicas em duas dimensões horizontais no espaço. Além disso, pode simular o traçadores;
  - TELEMAC-3D – destina-se a à realização de simulações hidrodinâmicas em três dimensões no espaço e também pode simular traçadores;
  - SPARTACUS-2D – este módulo lagrangeano simula em duas dimensões fluxos laminares e turbulentos utilizando o método SPH (*Smooth Particle Hydrodynamics*);
- **Sedimentologia**
  - SISYPHE – projectado em duas dimensões para simular o transporte de sedimentos através do arrastamento destes no leito e em suspensão;
  - SEDI-3D – tem a mesma funcionalidade que o módulo SISYPHE mas em três dimensões, está integrado no TELEMAC-3D;

➤ **Qualidade da água**

- SUBIEF-2D – simula o transporte de sedimentos suspensos e também traçadores em duas dimensões;
- SEDI-3D – simula o transporte de elementos na água, está integrado no TELEMAC-3D;
- Interface para o programa DELWAQ *Delft Hydraulics*;

➤ **Ondas**

- TOMAWAC – *software* configurado para simular o estado do mar em condições permanentes ou transitório usando um método espectral;
- ARTEMIS – projectado para simular as mudanças nas características da agitação marítima quer numa massa de água costeira ou num porto;

➤ **Fluxo de águas subterrâneas**

- ESTEL-2D – fluxos e transporte de poluentes no subsolo médio em duas dimensões;
- ESTEL-3D – fluxos e transporte de poluentes no subsolo médio em três dimensões;

➤ **Pós-processador**

- RUBENS
- FUDAA-PREPRO
- POSTEL-3D

4.1.3 MÓDULOS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO DO ESTUÁRIO DO RIO MINHO

Com o objectivo de fazer uma simulação hidrodinâmica e morfodinâmica do estuário do rio Minho recorreu-se as seguintes ferramentas:

- MATISSE – a formação da malha é geralmente uma fase difícil e demorado na modelação numérica 2D. MATISSE é um dos mais recentes geradores de malhas que foi especialmente desenvolvido para o sistema TELEMAC. O algoritmo usado na MATISSE é baseado em uma triangulação Delaunay restrita. O utilizador pode especificar o tamanho da malha em cada zona e também pode definir as linhas de restrição (linhas que a malha final terá que limitar).
- TELEMAC 2D – este *software* resolve as equações (águas pouco profundas) de Barré de Saint-Venant (1871) numa malha de duas dimensões. Em cada nó da malha computacional é calculada a profundidade de água e as duas componentes da velocidade. Portanto, este *software* implementa quatro equações hidrodinâmica, simultaneamente:

(continuidade)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} * \vec{\Delta}(h) + h \operatorname{div}(\vec{u}) = S_h \quad (4.1)$$

(quantidade de movimento em X)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} * \vec{\Delta}(u) = -g \frac{\partial z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h v_t \vec{\Delta} u) \quad (4.2)$$

(quantidade de movimento em Y)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} * \vec{\Delta}(v) = -g \frac{\partial z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h v_t \vec{\Delta} v) \quad (4.3)$$

(conservação de traçador)

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} * \vec{\Delta}(T) = S_T + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h v_T \vec{\Delta} T) \quad (4.4)$$

em que t representa o tempo; u, v as componentes da velocidade; g a aceleração da gravidade; h a profundidade da água; z a elevação da superfície livre; x e y as coordenadas horizontais do espaço, em

que  $h$ ,  $u$ ,  $v$  e  $t$  são as incógnitas;  $T$  é o traçador passivo;  $v_t$  e  $v_T$  representam a difusão turbulenta e a difusividade mássica;  $S_h$ ,  $S_x$ ,  $S_y$  e  $S_T$  representa a fonte ou desaparecimento do fluido, dos termos da equações dinâmicas e do traçador.

- SISYPHE – é o módulo que simula o transporte de sedimentos para o sistema TELEMAC. Resolve as equações dos sedimentos transportados por arrastamento e por carga suspensa, assim como faz a modelação do transporte de sedimentos coesivos. Sisyphé também inclui um modelo de consolidação multi-camada e lida com misturas de tipos de sedimentos. Sisyphé pode ser fortemente acoplados com TELEMAC-2D e 3D-TELEMAC enquanto incluindo entradas da TOMAWAC modelo de ondas para permitir a modelagem de longo prazo morfodinâmica.
- RUBENS – este *software* é utilizado para explorar os resultados obtidos nas simulações efectuadas. É um dos mais versáteis e poderosos programas de pós-processamento e que no entanto, é de fácil utilização.

#### 4.2. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

O objectivo deste trabalho era caracterizar o estuário do rio Minho, nos aspectos da hidrodinâmica e da dinâmica sedimentar, recorrendo à modelação matemática, e, se possível comparar esta modelação com outras realizadas no passado.

De forma a representar os diferentes cenários possíveis no estuário do rio Minho, foram feitas quatro simulações. Assim, foram modeladas para uma caudal característico de Verão e de Inverno uma maré viva e uma maré morta. Em complemento foram também feitas simulações para caudais de estiagem e de cheia.

A implantação do modelo foi efectuada de forma faseada, recorrendo a diferentes programas. De seguida serão descritos resumidamente os procedimentos adoptados.

Inicialmente foi feito um tratamento dos dados batimétricos, com o programa ArcGIS. Foram eliminados dados discordantes com o comportamento natural da batimetria, para evitar futuros problemas na construção da malha e também foi efectuada a separação dos dados topográficos e hidrográficos. Após a regularização dos dados batimétricos, estes foram introduzidos no módulo, MATISSE do sistema TELEMAC. Nesta fase foi definida a resolução da malha e as condições fronteira, de forma a gerar dois ficheiros (geo, cli), essenciais para a continuação do trabalho.

Posteriormente através do programa T\_Tide a maré foi simulada para os diferentes casos pretendidos. Com os resultados obtidos, foi gerado um ficheiro com as diferentes alturas da maré ao longo do tempo.

Uma parte importante do processo, consistiu na definição dos parâmetros físicos e numéricos do modelo, ficheiro (cas), que tem uma grande influência na simulação. Finalmente, após a elaboração dos diferentes ficheiros deu-se início às simulações no módulo TELEMAC-2D, que no final produz um ficheiro com os resultados (res).

No caso de se pertender efectuar simulações morfodinâmicas é necessário adicionar um ficheiro (sis\_cas) com a definição dos parâmetros e opções relativas a esta simulação. Em seguida, o módulo SISYPHE, responsável pela simulação morfodinâmica, corre paralelamente e troca informação com o módulo TELEMAC-2D, e no final cria o ficheiro de resultados (sis.res)

Para a visualização dos resultados finais foi necessário abrir o ficheiro gerado pelo TELEMAC-2D ou SISYPHE no módulo RUBENS.

A estrutura base utilizada para a elaboração do modelo é apresentada na figura 4.2.

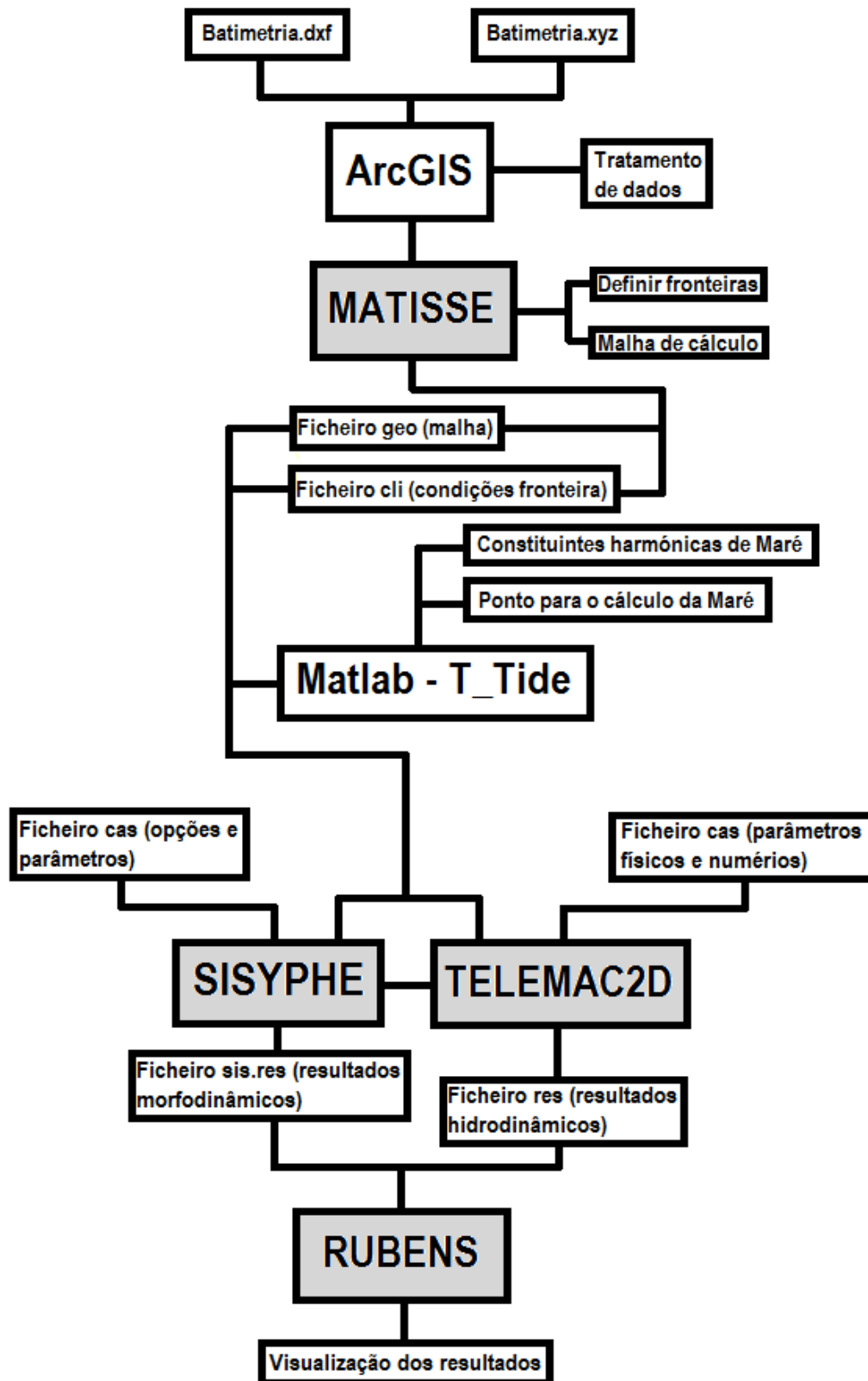


Fig.4.2 – Estrutura utilizada na construção do modelo. A cinzento encontram-se identificados os módulos do sistema TELEMAC.

### 4.3. CRIAÇÃO DO MODELO

A batimetria usada na construção do modelo do presente trabalho, foi definida a partir do levantamento topo-hidrográfico realizado pelo Instituto Hidrográfico, referente ao ano de 2006, que foi fornecida pelo INAG (Instituto da Água). O levantamento não abrange a totalidade do estuário, contudo representa a parte mais importante desde a embocadura até uma secção a montante de Vila Nova de Cerveira (16 km), com intervalo entre fiadas de 25 m.

Apesar de já ter 5 anos, esta batimetria é o mais recente levantamento efectuado no estuário do rio Minho. Portanto, devido à contínua evolução morfológica, principalmente neste sector do estuário, a simulação pode não reflectir o seu verdadeiro comportamento actual.

Através do módulo MATISSE do sistema TELEMAC foi contruída a malha 2D com uma resolução espacial de 25 m em 25 m, com base nos dados no referido levantamento. Neste módulo, também foram definidas as condições fronteira em toda a extensão do rio. Consideraram-se, obviamente, duas fronteiras abertas; a fronteira fluvial, a montante, onde se faz escoar o caudal fluvial e a fronteira oceânica a jusante, a qual é influenciada pela maré.

A batimetria modelada na figura 4.3, foi construída com base nas considerações acima referidas.

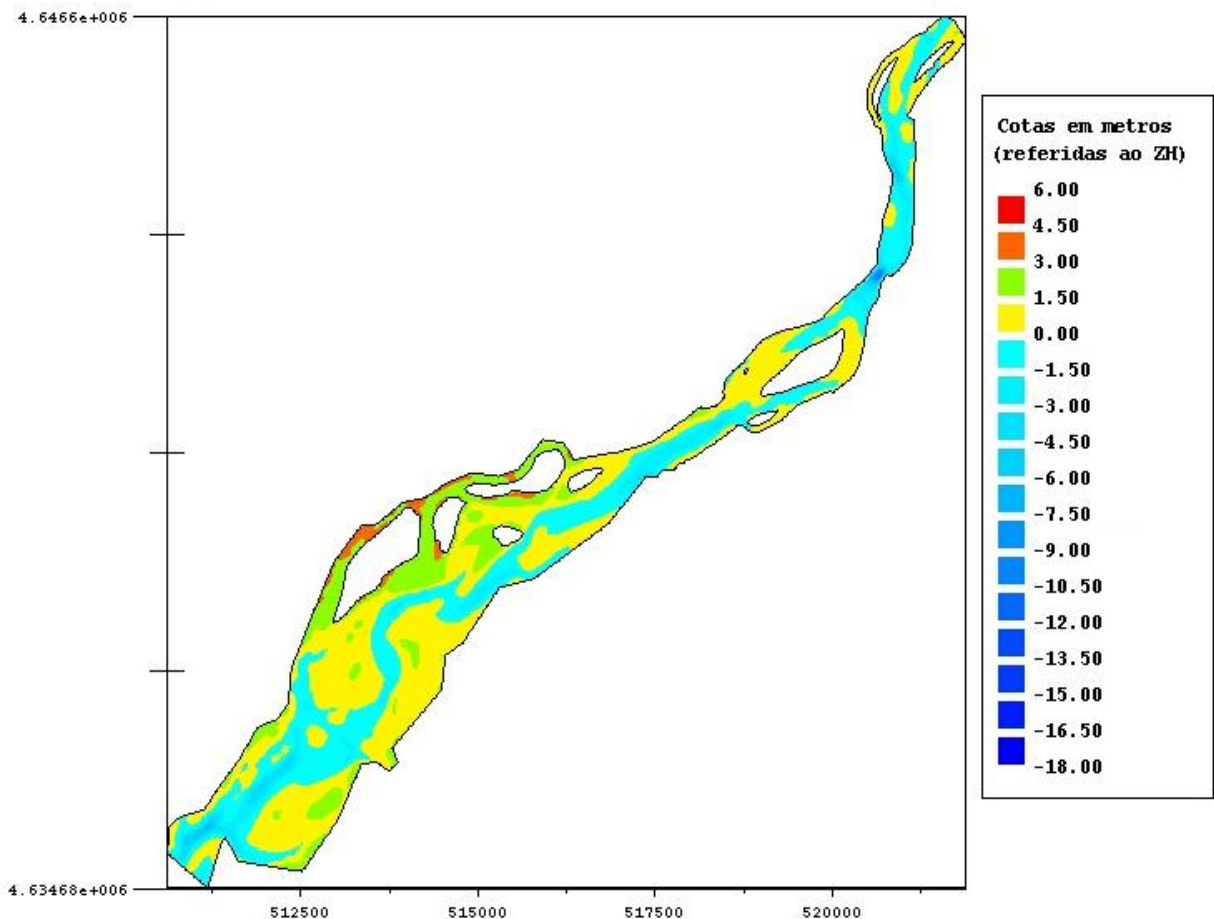


Fig.4.3 – Representação da batimetria modelada.

#### 4.3.1 DOMÍNIO E PASSO TEMPORAL

No cálculo foi utilizado um passo temporal de 12s, definido em conformidade com o limite imposto pelo número de Courant, ou seja,

$$C = v \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (5.1)$$

em que C representa o número de Courant (adimensional), v a velocidade (m/s),  $\Delta t$  o passo de cálculo (segundos) e  $\Delta x$  o comprimento da célula da malha de cálculo (m).

#### 4.3.2 ATRITO DE FUNDO

O coeficiente de atrito de fundo foi introduzido através da rugosidade de Manning que após a calibração do modelo foi admitida igual a  $0.045 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  para marés vivas e de  $0.070 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  para marés mortas e que por simplificação foi considerada constante ao longo de estuário.

#### 4.3.3 FORÇAS DE MARÉ

A simulação dos níveis de maré na fronteira aberta ao largo da foz do rio Minho foi efectuada recorrendo ao programa T\_Tide através do *software* Matlab ([www.eos.ubc.ca/~rich/#T\\_Tide](http://www.eos.ubc.ca/~rich/#T_Tide)).

Neste programa foram consideradas 5 constituintes de maré principais ( $M_s, S_2, K_2, O_1, K_1$ ), deduzidas do marégrafo de Viana do Castelo (Zacarias, 2007). Através da definição de um ponto de origem (latitude, longitude) e com um determinado intervalo de tempo estipulado o programa procede à simulação das alturas de maré.

#### 4.3.4 CAUDAL

O caudal imposto na fronteira a montante, foi baseado nos dados apresentados por Zacarias (2007). Para a campanha de Setembro/Outubro de 2005 foi calculado um caudal médio de  $91,96 \text{ m}^3/\text{s}$  e, relativamente à campanha de Fevereiro/Março de 2006 o caudal médio foi de  $582,77 \text{ m}^3/\text{s}$ , figura 4.4.

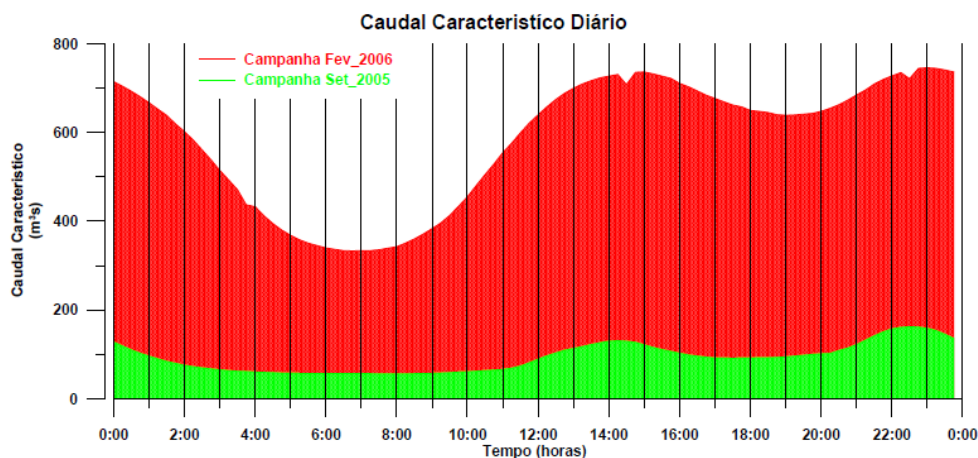


Fig.4.4 –Caudal característico diário para os períodos das duas campanhas (Zacarias, 2007).

Com o objectivo de simular um maior número de casos possível e para aprofundar o conhecimento sobre o estuário do rio Minho, foi realizada a modelação para situações de extremos (estiagem e cheias).

Segundo os dados disponíveis em Zacarias (2007), o caudal apresenta uma enorme variação sazonal (figura 4.5) mas nunca atinge valores nulos, apresentando um valor mínimo que ronda os 60 m<sup>3</sup>/s.

No inverno o caudal aumenta e são identificados dois picos, um no fim de Março de 2006 e outro no fim de Dezembro de 2006 até ao fim de Janeiro de 2007. Este é maior e mais extenso com os valores a atingirem os 2500 m<sup>3</sup>/s. Portanto, como complemento, foram simuladas quer para as marés vivas quer para as marés mortas um caudal de 60 m<sup>3</sup>/s e um de 2500 m<sup>3</sup>/s.

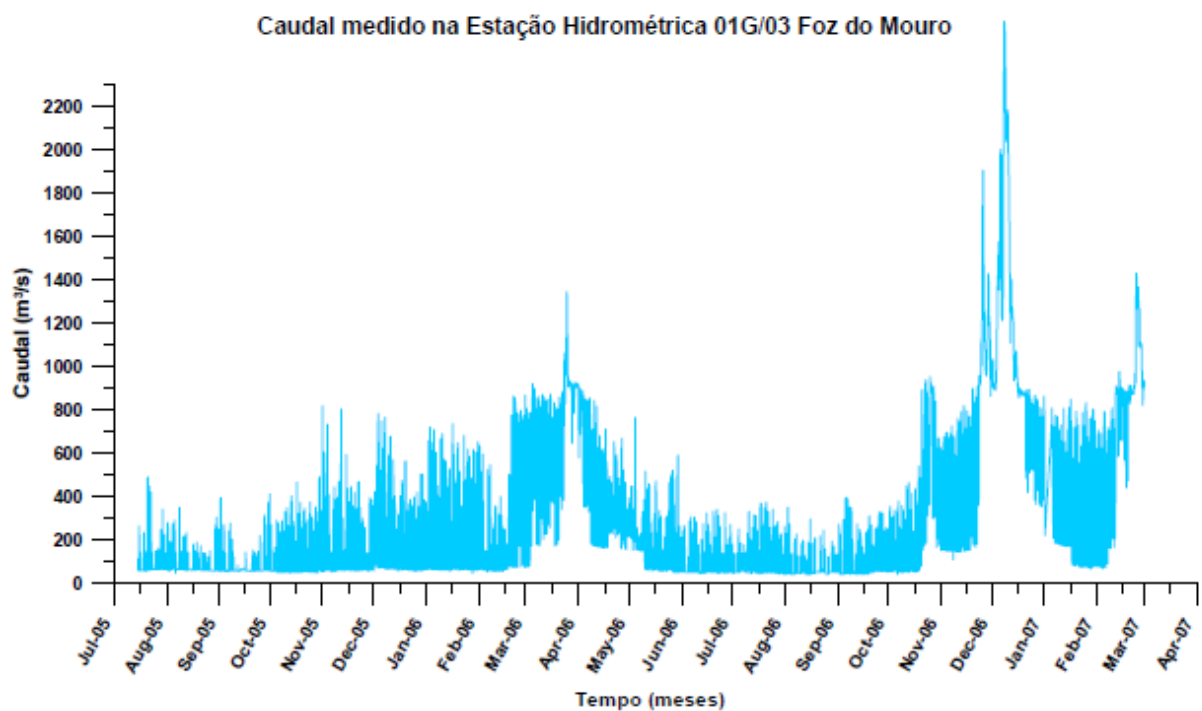


Fig.4.5 –Caudal fluvial medido na estação hidrométrica 01G/03 de Foz do Mouro (Zacarias, 2007).

#### 4.4. VALIDAÇÃO DO MODELO

A validação do modelo hidrodinâmico foi efectuada através da comparação dos valores calculados de níveis de maré com dados de uma campanha de medição realizada em 1990, Consulmar (1990). As observações referem-se a três estações (Camarido, Seixas e Vila Nova de Cerveira) e compreendem dois períodos de 13 horas, um em maré viva (20 de Setembro de 1990) e outro em maré morta (27 de Setembro de 1990), figura 4.6.



Fig.4.6 – Zonas de referência utilizadas para a verificação do modelo.

Este processo de validação do modelo foi comparado com o realizado por LNEC (2007b) na verificação dos seus dois modelos testados. Das duas malhas estudadas por LNEC (2007b) uma representa a batimetria da década de 80 (levantamentos de 1982-86) e a outra foi construída através dos mesmos dados batimétricos empregues neste trabalho (levantamento de 2006). Para a realização da modelação esta entidade utilizou o modelo MOHID. Assim, para uma melhor análise, foram também utilizados os resultados das simulações do LNEC (2007b) na comparação do modelo.

Segundo o LNEC (2007b), foi constatado um desvio sistemático entre níveis de maré observados por Consulmar (1990) e os calculados, em cerca de 0,20 m, tanto em maré viva como em maré morta e associou este desvio à fixação do nível de referência das observações. No entanto, é possível que esse desvio tenha outras causas, como por exemplo, a subida do nível médio da água do mar em relação ao ZH. Assim, como correcção, foram reduzidos em 0,20 m aos valores observados por Consulmar (1990).

A maré utilizada, recorrendo ao programa T\_Tide, não coincidiu totalmente com os dados disponíveis de LNEC (2007b), isto é, a maré viva em 20 de Setembro e a maré morta em 27 de Setembro não convergiram com os dados da maré calculados. Portanto foi necessário efectuar algumas adaptações, o que pode justificar diferenças relativamente às observações e às simulações realizadas pelo LNEC (2007b), quer em maré viva quer em maré morta.

Nas Tabelas 4.1 e 4.2 e nas figuras 4.7 e 4.8 são apresentados os níveis da maré calculados pelo TELEMAC, e comparados com as observações por Consulmar (1990) e os calculados pelo LNEC (2007b) com as batimetrias de 1982-86 e de 2006. Não foi possível sobrepor o gráfico do nível da maré calculado com os restantes gráficos para um melhor confronto, no entanto, é possível retirar algumas conclusões e no âmbito geral aprovar a calibração do modelo.

As simulações em maré viva concordam com as observações, ao preverem a ocorrência de níveis de baixa-mar mais elevados no interior do estuários (Seixas e V. N. de Cerveira) do que na embocadura (Camarido), o que está de acordo com o que foi apresentado em 3.2.4.

As simulações em maré morta também apresentam uma boa concordância, verificando-se uma menor distorção da maré no interior do estuário.

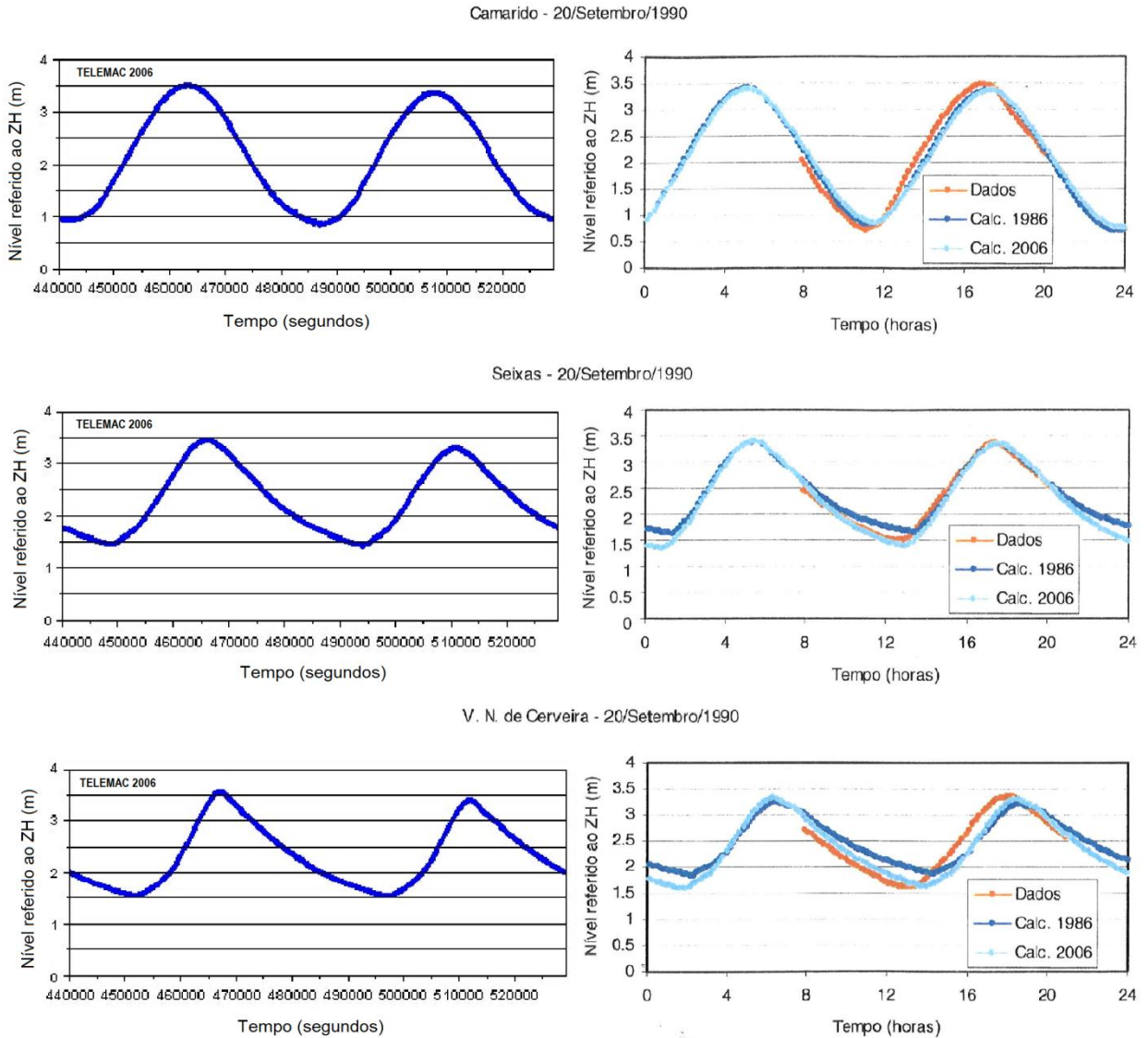


Fig.4.7 – Propagação da maré viva de 20 de Setembro de 1990. Comparação entre valores observados (Consulmar, 1990) e valores calculados com batimetrias de 1982-86 e de 2006 (LNEC, 2007b) com a batimetria de 2006 calculado com o sistema TELEMAC: a) Camarido; b) Seixas; c) V. N. de Cerveira.

Tabela 4.1 – Níveis de maré (m) em maré viva, observados (Consulmar, 1990) e calculados com batimetrias de 1982-86 e de 2006 (LNEC, 2007b) e com a batimetria de 2006 recorrendo ao sistema TELEMAC.

Maré viva	Dados		Cálc. 1982-86 (LNEC)		Cálc. 2006 (LNEC)		TELEMAC 2006	
	PM	BM	PM	BM	PM	BM	PM	BM
Camarido	3,46	0,72	3,36	0,82	3,35	0,86	3,35	0,82
Seixas	3,34	1,49	3,33	1,66	3,34	1,39	3,30	1,42
V. N. Cerveira	3,35	1,61	3,20	1,86	3,28	1,62	3,36	1,55

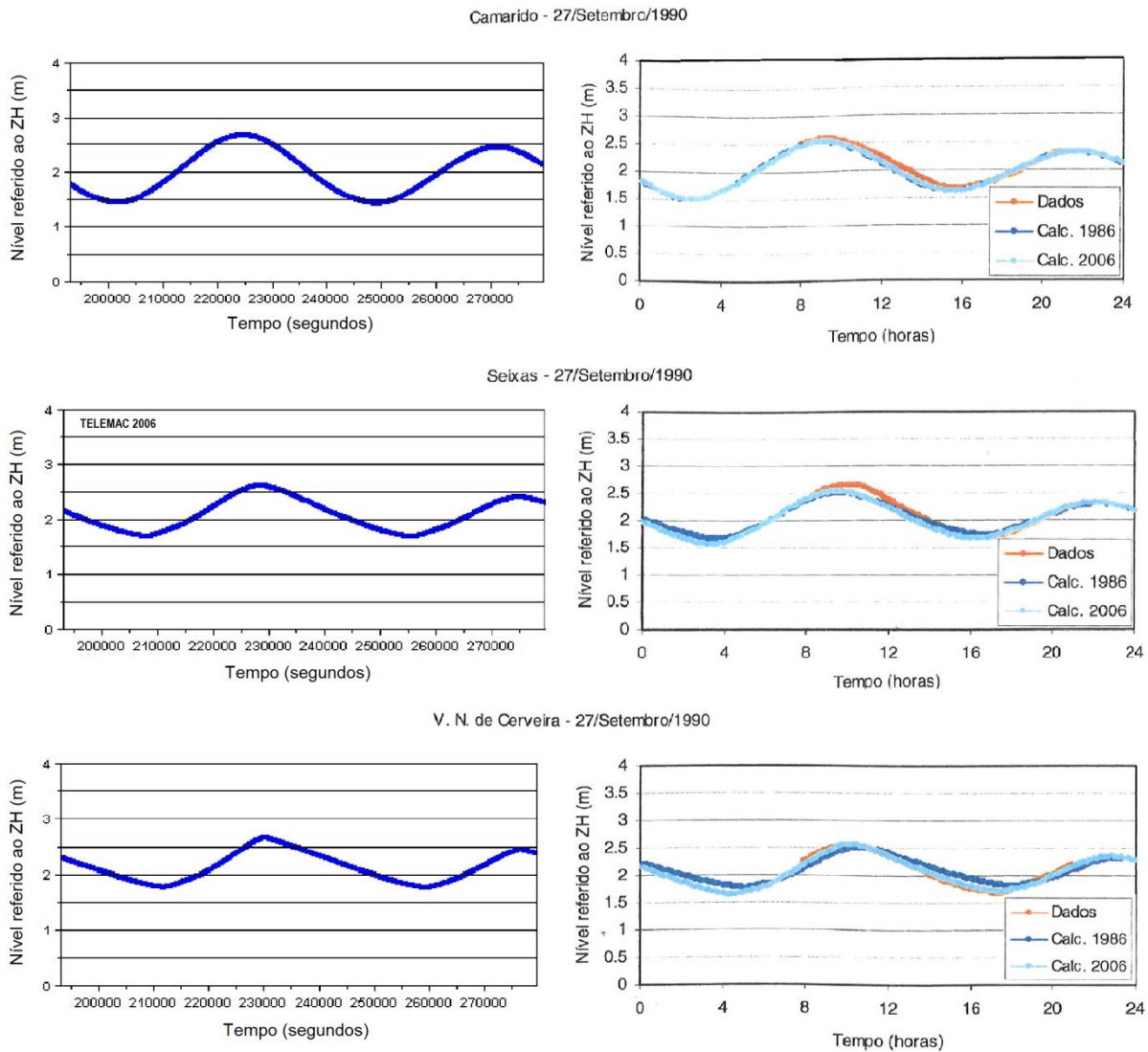


Fig.4.8 – Propagação da maré morta de 27 de Setembro de 1990. Comparação entre valores observados (Consulmar, 1990) e valores calculados com batimetrias de 1982-86 e de 2006 (LNEC, 2007b) com a batimetria de 2006 calculado com o sistema TELEMAC: a) Camarido; b) Seixas; c) V. N. de Cerveira.

Tabela 4.2 – Níveis de maré (m) em Maré morta, observados (Consulmar, 1990) e calculados com batimetria de 1982-86 e de 2006 (LNEC, 2007b) e com a batimetria de 2006 recorrendo ao sistema TELEMAC.

Maré morta	Dados		Cálc. 1982-86 (LNEC)		Cálc. 2006 (LNEC)		TELEMAC 2006	
	PM	BM	PM	BM	PM	BM	PM	BM
Camarido	2,58	1,67	2,53	1,61	2,53	1,61	2,65	1,50
Seixas	2,64	1,69	2,51	1,72	2,53	1,65	2,62	1,69
V. N. Cerveira	2,58	1,67	2,51	1,81	2,56	1,71	2,65	1,77

A propagação da maré ao longo do estuário, em situação de maré viva, pode ser melhor analisado, sobrepondo as várias estações (figura 4.9). Os dados de Consulmar (1990) indicam uma maior

proximidade no tempo entre as estações de Seixas e de Vila Nova de Cerveira, enquanto que as simulações de LNEC (2007b) indicam uma maior proximidade entre Camarido e Seixas. Em relação à simulação efectuada com o TELEMAC, apresenta-se como um meio termo dos dois, mas com uma pequena tendência de proximidade entre as estações de Seixas e Vila Nova de Cerveira. Também se verifica que no Camarido a maré tem uma variação mais sinusoidal do que para o interior do estuário, o que era de esperar.

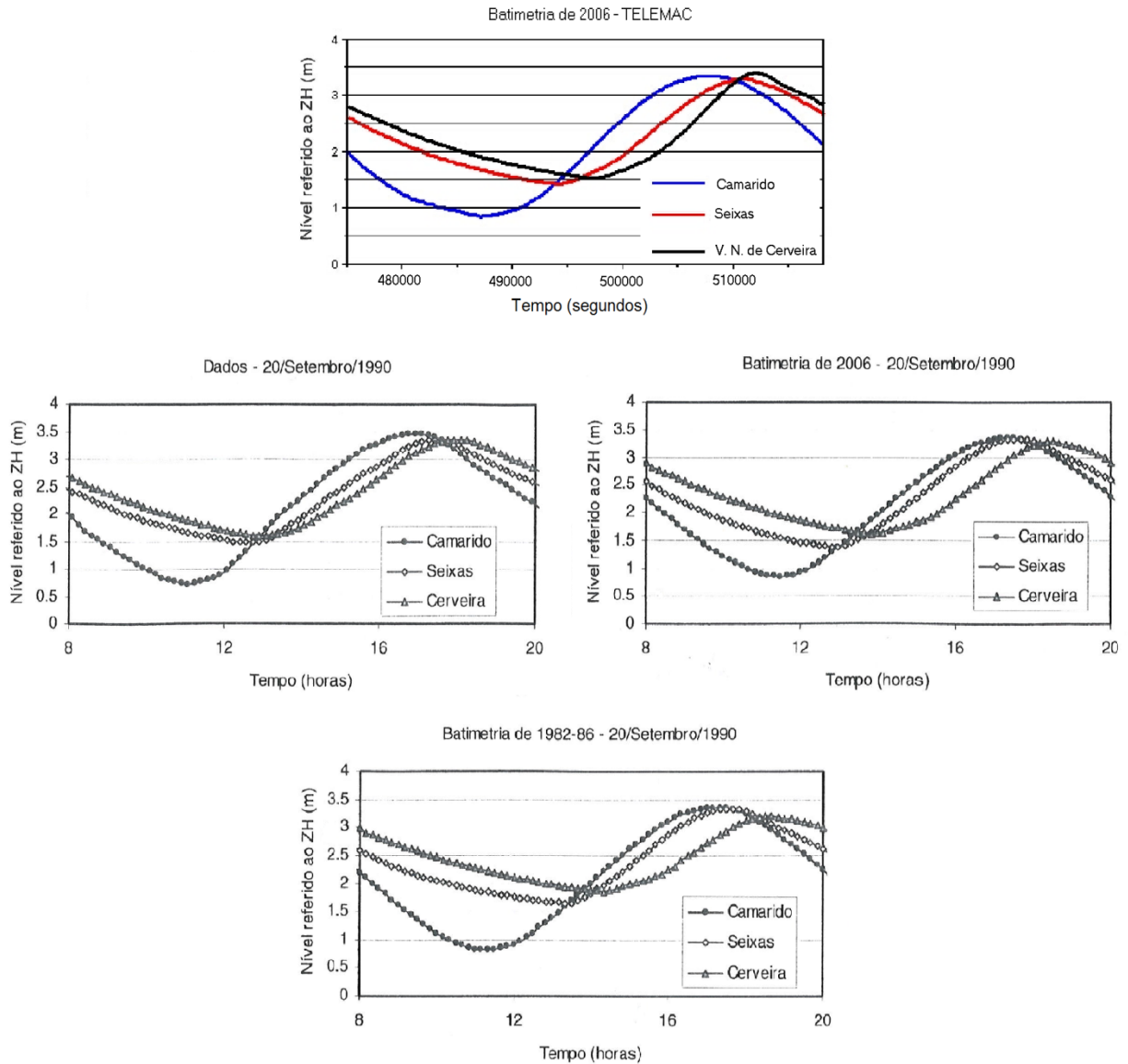


Fig.4.9 – Propagação da maré viva de 20 de Setembro de 1990. Comparação entre Camarido, Seixas e V. N. de Cerveira: a) Cálculo com o software TELEMAC; b) Dados; c) Cálculo com batimetria de 1982-86, pelo LNEC; d) Cálculo com batimetria de 2006, pelo LNEC.

Deve ter-se em conta que o ajustamento da simulação depende de vários factores, como por exemplo: da batimetria, muito variável no tempo; do nível médio, cuja fixação envolve alguma incerteza; para além da falta de dados relativamente à zona exterior do estuário, para a propagação da maré desde o alto mar até à costa.

Para as simulações de transporte de sedimentos não-coesivos, não foi possível obter dados relativos a medição de transporte de sedimentos no estuário do rio Minho portanto, não se dispunha de uma referência para a calibração do modelo.

No entanto, LNEC (2007b) efectuou também simulações morfodinâmicas, as quais serviram como referência para as simulações efectuadas neste trabalho. Nesse trabalho foi utilizado o método de Arckers-White que envolve a especificação do diâmetro característico  $D_{35}$ , igual a 0,5 mm. Na conversão entre massa e volume foi admitida uma porosidade de 40%, correspondente a uma massa volúmica aparente de cerca de  $1600 \text{ kg m}^{-3}$ .

Com base nestes dados efectuaram-se as várias simulações morfodinâmicas. Contudo, neste caso foi utilizado o método de Engelund-Hansen alterado por Cholley e Cunge o qual envolve a especificação do diâmetro característico  $D_{50}$ , tendo sido também adoptado o diâmetro de 0,5 mm. Optou-se por este método porque calcula o transporte de sedimentos por arrastamento e por suspensão, simultaneamente. A comparação das duas simulações é ilustrada na figura 4.10.

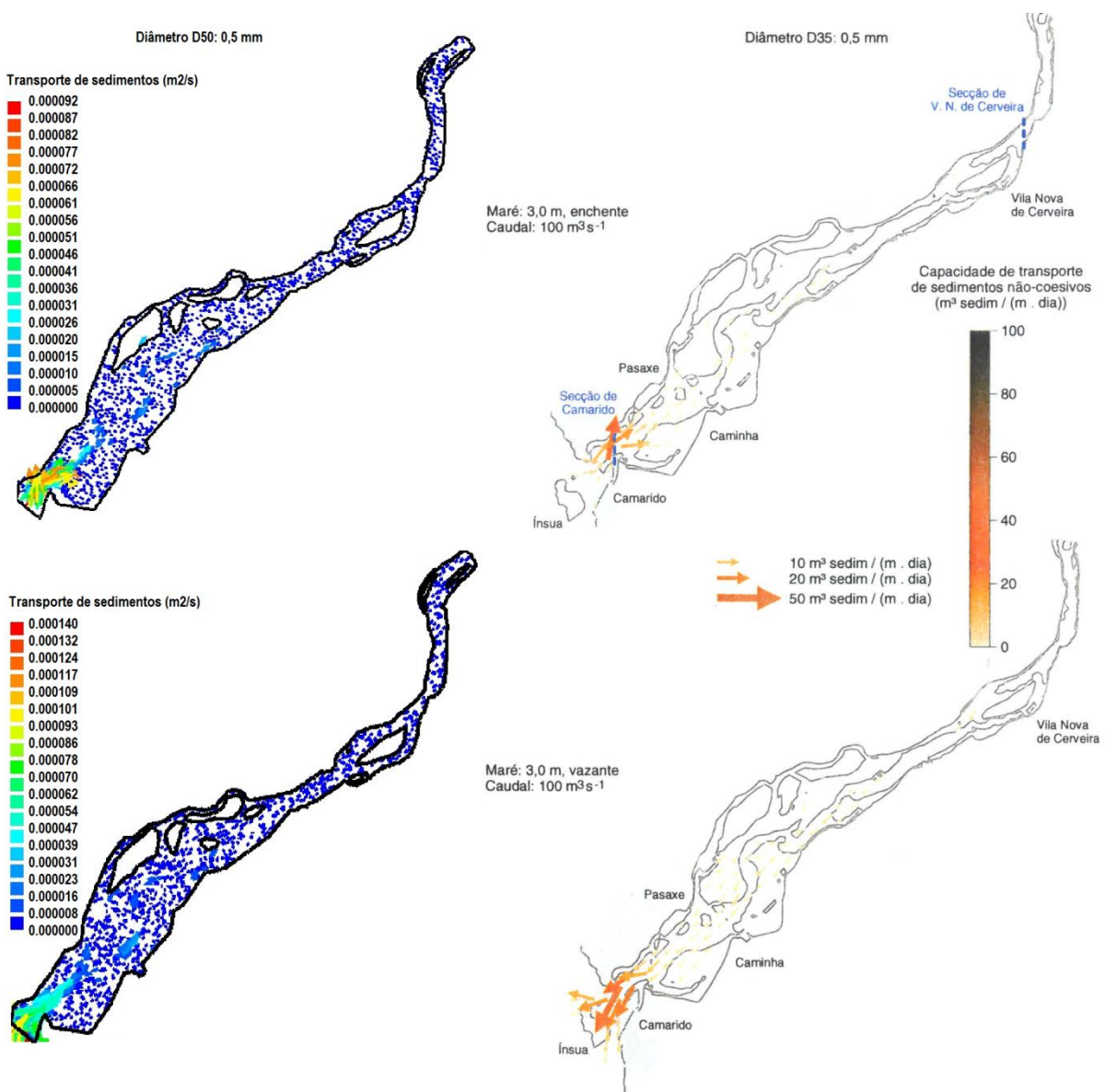


Fig.4.10 – Capacidade de transporte de sedimentos não-coesivos em maré viva para um caudal de  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Comparação entre a simulação efectuada com o TELEMAC e a do LNEC (2007b)

Como se pode verificar, os resultados obtidos são diferentes comparativamente com os do LNEC (2007b). Confrontando as duas simulações na embocadura, verifica-se, aproximadamente, um transporte de 30 m<sup>2</sup> sedimentos/dia em enchente e 35 m<sup>2</sup> sedimentos/dia em vazante, na modelação de LNEC (2007b) contra 7,95 m<sup>2</sup> sedimentos/dia e 12,1m<sup>2</sup> sedimentos/dia em enchente e vazante, respectivamente. Contudo, observa-se que a capacidade de transporte de sedimentos é maior na zona da embocadura do que no resto do estuário, para as duas simulações. A diferença dos resultado justifica-se porque as simulações basearam-se em diferentes métodos empíricos, e segundo o que foi possível averiguar esta divergência é provável (Scapin, 2007).

#### 4.5. RESULTADOS

Como já foi referido, foram analisados para as marés vivas e para as marés mortas quatro caudais diferentes (91,96 m<sup>3</sup>/s, 582,77 m<sup>3</sup>/s, 60 m<sup>3</sup>/s, 2500 m<sup>3</sup>/s) e os resultados encontram-se em anexo. Através do programa T\_Tide foram simuladas as marés de Setembro de 2005, de Fevereiro de 2006 e de Janeiro de 2007, de onde foram retirados excertos para realizar a simulação de maré viva e da maré morta, para as diferentes simulações.

Para cada uma das simulação será apresentada a variação da maré imposta na fronteira marítima e em três diferentes pontos no interior do estuário (Camarido, Seixas e V.N. de Cerveira). Em seguida será exposto, para quatro diferentes instantes de tempo, figuras da superfície livre e da velocidade do escoamento. Esse quatro instantes têm o intuito de apresentar resultados no momento da enchente, no fim da enchente (preia-mar), na vazante e no fim da vazante (baixa-mar). Contudo, existe um desfazamento em tempo entre as curvas de maré ao longo do estuário, ou seja, os instantes de preia-mar e baixa-mar não são os mesmos, ocorrendo primeiramente a maré na embocadura e depois propaga-se progressivamente para o interior do estuário, o que está de acordo com o que foi apresentado em 3.2.4. Portanto, existiu uma certa dificuldade na escolha dos instantes para representação dos diversos momentos.

Para as simulações morfodinâmicas serão também apresentados, para a enchente e para a vazante, figuras com a capacidade de transporte de sedimentos. Nas zonas onde se verifica uma maior intensidade de transporte será apresentada uma outra figura mais detalhada, com a mesma legenda de cores da figura homóloga.

Ao longo da realização do trabalho surgiram várias dificuldades e obstáculos que foram ultrapassados com sucesso, no entanto, há um que merece destaque devido a não satisfazer totalmente os resultados pretendidos.

Na fronteira marítima onde se impôs a variação do nível da maré surgiram valores de velocidade e da superfície livre irrealistas. A fronteira marítima deve ser definida bastante longe da costa para que a profundidade seja maior e as velocidade menores, contudo não foi possível proceder a esta recomendação devido à não disponibilidade de dados batimétricos. Apesar disso, o TELEMAC2D dispõe de uma opção própria para este género de casos, a qual foi accionada. Com o accionamento desta opção, o *software* calcula os valores em falta que foram neste caso a velocidade na fronteira com imposição de altura (fronteira marítima). Desta forma, foi possível mitigar os valores incorrectos, para valores aceitáveis.

No entanto, em alguns casos, nessa mesma fronteira surgiram valores de velocidades e transporte de sedimentos um pouco maiores de que o esperado que provavelmente não correspondem a realidade, o que é também justificado pela falta de dados batimétricos do exterior do estuário. Deste modo, para uma leitura mais fácil foi imposta manualmente o limite máximo da legenda a cores, o que pode levar a uma pequena imprecisão.

## 4.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.6.1 CAMPOS DE VELOCIDADES

Da análise das simulações apresentadas relativas às velocidades, conclui-se que de uma forma geral a velocidade da vazante é superior à da enchente, e que a duração da vazante é também superior à da enchente. A corrente é mais forte na embocadura do que no interior do estuário como também é mais forte em marés vivas do que em marés mortas., tal como foi apresentado em 3.2.6 e como era também de esperar.

A tabela 3.4 do capítulo 3, contém três observações diferentes das velocidades da corrente na embocadura e no sector inferior. Esses valores estão divididos consoante se tratam de enchente ou vazante, maré viva ou maré morta, e foram comparados com os calculados pelo modelo. No entanto os dados medidos não têm a informação sobre o caudal fluvial nem a altura do ano em que foram medidos. Desta forma os valores não são uma referência exacta, apenas valores comparativos, para os quais se pode verificar se há ou não grandes discrepâncias.

Como na tabela 3.4 do capítulo 3 existem três observações diferentes para cada um dos estados da corrente, utilizou-se apenas o menor e o maior valor, obtendo-se um intervalo de variação, como está representado na tabela 4.3. Em relação aos valores calculados apresentam-se os valores com caudais característicos (91,96 m<sup>3</sup>/s e 582,77 m<sup>3</sup>/s) e os valores de caudais de extremos (60,00 m<sup>3</sup>/s e 2500m<sup>3</sup>/s), para cada estado da corrente, tabela 4.3. Os valores para os diferentes caudais foram retirados das seguintes figuras: 3, 7, 16 e 20, para o caudal de 91,96 m<sup>3</sup>/s; 28, 32, 41 e 45, para o caudal de 582,77 m<sup>3</sup>/s; 54, 58, 67 e 71 para o caudal de 60,00 m<sup>3</sup>/s; 79, 81, 88 e 90 para caudal 2500,00 m<sup>3</sup>/s.

Tabela 4.3 – Comparação de correntes de maré em marés vivas (MV) e marés mortas (MM) entre os valores facultados na tabela 3.4 do capítulo 3 com os valores calculados.

Embocadura	Valores de referência	Valores medidos			
		Valores c/ caudais característicos		valores c/ caudais de extremos	
		91,96 m <sup>3</sup> /s	582,77 m <sup>3</sup> /s	60,00 m <sup>3</sup> /s	2500,00 m <sup>3</sup> /s
MV Vazante	0,8-1,8	1,16	1,4	1,15	2,0
MV Enchente	0,8-1,4	0,93	0,5	0,94	0,4*
MM Vazante	0,6-0,9	0,59	0,82	0,56	1,45
MM Enchente	0,5-0,6	0,45	0,18	0,47	0,92*

\*sentido de montante para jusante

Como se pode observar através da tabela 5.11, os valores das correntes calculados com os caudais característicos, estão dentro ou próximo do intervalo de variação com excepção da enchente em maré morta com o caudal de 582,77 m<sup>3</sup>/s, que apresenta um valor bastante menor. No entanto, com a implementação de um caudal elevado, como é o caso, este oferece resistência à entrada da maré no estuário, fazendo com que a velocidade à entrada desta diminua, como seria de esperar. Portanto, julga-se que não existe nenhum desarresto em relação a este valor, tal como acontece para a enchente em maré viva do mesmo caudal.

Relativamente aos caudais extremos, os valores situam-se fora do intervalo devido ao facto de provavelmente não terem sido medidos nas mesmas circunstâncias, por exemplo, na vazante para a

maré viva e para a maré morta, com um caudal de 2500,00 m<sup>3</sup>/s e na enchente para a maré viva e para a maré morta para o mesmo caudal. Estes valores chegam mesmo a alterar o sentido do escoamento, ocorrendo de montante para jusante, o que é natural devido ao grande caudal fluvial, sendo a enchente apenas uma resistência ao caudal fluvial fazendo com que o escoamento para jusante apenas se faça mais devagar. Os outros valores encontram-se dentro ou próximo de intervalo.

Tal como foi apresentado no capítulo 3 a modelação revelou o mesmo comportamento em relação aos parâmetros hidrológicos dominantes referidos. Nas zonas mais a jusante estes parâmetros são dominados pela maré e nas zonas mais a montante são dominados pelo caudal fluvial (figuras 3, 16, 28 e 41) e nas zonas intermédias estes são dominados pela maré em baixos caudais (figuras 3 e 16). Já quando o caudal é elevado e as marés têm amplitudes pequenas o forçamento dominante é o caudal fluvial (figura 41). No entanto, o modelo também revelou que com um caudal extremamente elevados (2500,00 m<sup>3</sup>/s) o estuário passa a ser todo ele dominado pelo caudal fluvial, inclusivé a zona a jusante.

#### 4.6.2 SUPERFÍCIE LIVRE

Da análise das figuras 1, 14, 26, 39, 52, 65, 77 e 86 verifica-se que os resultados das simulações convergem com o que foi apresentado em 3.2.4 do capítulo 3. Segundo o que foi mencionado nesse capítulo e o observado nestas figuras: à medida que se caminha para montante os valores do nível mínimo da superfície livre vão sendo maiores, levando a uma diminuição das amplitudes da maré no mesmo sentido; apresentam assimetria das curvas de maré, quer relativamente ao nível médio, quer à duração da enchente e, quando comparada com a vazante, essa diferença temporal revela que a enchente aparenta ser mais reduzida relativamente à duração da vazante; observa-se também um desfazamento temporal entre as curvas de maré nos vários locais apresentados, ou seja, os instantes de preia-mar e baixa-mar não são os mesmos, ocorrendo em primeiro lugar na entrada do estuário e só depois no Camarido, em Seixas e finalmente em Vila Nova de Cerveira; por fim como também foi observado na figura 3.6 do capítulo 3, que a partir de 5 de Março a deformação da onda de maré é diferente de Seixas para montante, porque corresponde a um aumento do caudal; as figuras 26, 39, 77 e 86 também revelam o mesmo comportamento, e quanto maior o caudal maior é a deformação. Curiosamente a variação da amplitude de maré, deixa praticamente de se fazer sentir em Vila Nova de Cerveira com um caudal de 587,77 m<sup>3</sup>/s em maré morta e para o caudal de 2500,00 m<sup>3</sup>/s em maré morta e maré viva.

O comportamento da superfície livre varia consoante o caudal e a amplitude de maré. Quando o caudal é pequeno (60 m<sup>3</sup>/s e 91,96 m<sup>3</sup>/s), quer em marés vivas quer em marés mortas, a configuração da superfície livre é igual, variando apenas quando se trata de uma vazante ou de uma enchente. Portanto, em enchente o nível da água é mais baixo a montante e mais alto a jusante (figuras 2, 15, 53 e 66), invertendo-se na vazante sendo mais baixo a jusante e mais alto a montante (figuras 6, 19, 57 e 70). No entanto, na vazante a diferença entre o nível da água de montante com o de jusante é maior do que na enchente.

Para caudais mais elevados o comportamento varia. Na presença de um caudal elevado mas não extremo (582,77 m<sup>3</sup>/s) em marés vivas em enchente verifica-se que na zona central do estuário, o nível da água é mais baixo sendo a montante e a jusante mais elevado (figura 27). Na vazante é mais baixo a jusante e mais alto a montante (figura 31). Em marés mortas com o mesmo caudal quer em enchente quer em vazante, o nível da água é mais elevado a montante do que a jusante (figuras 40 e 44). Para um caudal extremo (2500 m<sup>3</sup>/s), quer em maré viva quer em maré morta e quer na enchente quer na vazante, o nível da superfície da água é mais elevado a montante e mais baixo a jusante (figura 78, 80, 87 e 89), o que é natural porque o estuário passa praticamente a ser dominado pelo caudal fluvial.

Portanto durante a vazante o nível da água é sempre superior a montante em relação a jusante. Já durante a enchente, com pequenos caudais a superfície livre é mais elevada a jusante em relação a montante, no entanto tem tendência a inverter a configuração com o aumento do caudal e a diminuição da amplitude da maré. Conclui-se assim que o nível da superfície livre é sempre descendente no sentido da corrente.

#### 4.6.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

No caso do transporte de sedimentos não existe, ou pelo menos não foi possível a recolha de informação relativa a medições deste parâmetro, pelo que avaliação dos resultados é limitada.

Apesar disso, com base nos resultados obtidos, pode concluir-se que, de uma forma geral, o transporte de sedimentos é muito mais significativo em maré viva do que em maré morta, aumenta com o caudal fluvial e na zona da embocadura é onde se manifesta mais este fenómeno.

Analisando as figuras 10 e 61 conclui-se que durante as marés vivas com um caudal baixo (91,96 m<sup>3</sup>/s e 60,00 m<sup>3</sup>/s) a enchente provoca um maior volume de transporte de sedimentos na embocadura que se prolifera timidamente para montante. Já durante a vazante apenas se observa transporte de sedimentos na zona da embocadura, figuras 12 e 63. Em relação às marés mortas, na enchente não há praticamente transporte de sedimentos em todo o estuário (figuras 23 e 74), ao contrário da vazante onde se observa um pequeno volume de transporte na embocadura, figuras 24 e 75.

Com o aumento do caudal confirma-se um aumento do transporte de sedimentos no estuário, como se esperava. Portanto, com um caudal fluvial de 582,77 m<sup>3</sup>/s na enchente da maré viva constata-se alguma movimentação de sedimentos na embocadura e na zona a montante (figura 35), em maré morta passa-se a observar apenas algum movimento na zona a montante, figura 48 Por sua vez na vazante quer para a maré morta, quer para a maré viva, verifica-se algum transporte de sedimentos na embocadura, mas também ao longo do estuário (figuras 37 e 50), principalmente na maré viva.

Com um caudal extremo de 2500 m<sup>3</sup>/s constatou-se um grande volume de transporte de sedimentos e sempre no sentido montante-jusante, inclusive na enchente. Deste modo, durante a enchente verifica-se uma grande movimentação na zona a montante do estuário devido ao forte caudal, e a jusante com menor intensidade principalmente na maré viva, figuras 82 e 91. Já na vazante verifica-se transporte de sedimentos em todo o estuário, com maior pendor na embocadura no caso da maré viva e ao longo de todo o estuário nas marés mortas, figuras 84 e 93.

Resumidamente, as enchentes apenas provocam transporte de sedimentos em maré viva. Por sua vez, a vazante, quer em maré morta quer em maré viva produz transporte de sedimentos na embocadura com qualquer caudal. Contudo, com o aumento progressivo do caudal fluvial origina gradualmente um aumento de transporte de sedimentos em todo o estuário com sentido montante-jusante.

No entanto estas descrições não servem para comparar o volume global de sedimentos transportados para as diferentes simulações. A tabela 4.4 compara esse transporte para a embocadura do rio Minho.

Na tabela 4.4 apresentam-se também os valores máximos de velocidade e de transporte de sedimentos para a embocadura, nas oito simulações efectuadas. Pretende-se assim facilitar a comparação dos diferentes valores, na zona com maior acção do estuário. O valores foram retirados da tabela 4.3 para as velocidades da corrente e das figuras 10, 12, 23, 24, 35, 37, 48, 50, 61, 63, 74, 75, 82, 84, 91 e 93 para o transporte de sedimentos.

Tabela 4.4 – Valores máximos de velocidade e de transporte de sedimentos na embocadura, nas oito simulações efectuadas.

Embocadura	Velocidade (m/s)		Transporte de sedimentos (m <sup>2</sup> /s)		
		Enchente	Vazante	Enchente	Vazante
Caudal = 91,96 m <sup>3</sup> /s	Setembro MV	0,93	1,16	0,0001	0,00015
	Setembro MM	0,45	0,59	0	0,00003
Caudal = 582,77 m <sup>3</sup> /s	Fevereiro MV	0,50	1,4	0,00007	0,00017
	Fevereiro MM	0,18	0,82	0	0,00004
Caudal = 60,00 m <sup>3</sup> /s	Setembro MV	0,94	1,15	0,000105	0,00011
	Setembro MM	0,47	0,56	0	0,00003
Caudal = 2500,00 m <sup>3</sup> /s	Janeiro MV	0,40*	2,0	0,00002*	0,000560
	Janeiro MM	0,92*	1,45	0,000037*	0,000067

\* sentido de montante para jusante

De um modo geral, esta tabela traduz que as velocidades, tal como o transporte de sedimentos é maior em vazante do que na enchente e também maior em maré viva do que em maré morta.

Verifica-se que os valores das correntes são pouco sensíveis a mudanças de caudais, a não ser que sejam bastante grandes. Por exemplo, de 60,00 m<sup>3</sup>/s para 91,96 m<sup>3</sup>/s, não houve grande alteração nos valores da velocidade da corrente e do transporte de sedimentos. Por outro lado observa-se que a mudança de maré morta para maré viva proporciona uma grande alteração quer na velocidade quer no transporte de sedimentos.

Constata-se que à medida que o caudal fluvial vai aumentando, a velocidade de enchente vai diminuindo e até chega a alterar o seu sentido quando o caudal é muito elevado, por exemplo com 2500 m<sup>3</sup>/s.

Ainda como complemento foram disponibilizadas figuras da final da enchente/preia-mar (figuras 5, 18, 30, 43 56 e 69) e da final da vazante/baixa-mar (figuras 9, 22, 34, 47, 60 e 73), para a velocidade da corrente. Estas figuras têm a curiosidade de se observar a mudança de direcção da corrente. Relativamente ao caudal de 2500,00 m<sup>3</sup>/s, não se justificou apresentar essa informação porque a corrente não sofreu alterações do sentido em toda a série.

Além disso, também foram apresentadas figuras com maior pormenor das zonas com transporte de sedimentos mais intenso quer para as enchentes (figuras 11, 36, 49, 62, 83 e 92) quer para as vazantes (figuras 13, 25, 38, 51, 64, 76, 85 e 94).



# 5

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora seja um estuário relativamente pouco estudado, a existência de algumas informações de base permitem tirar conclusões consideravelmente úteis. Como complemento da informação recolhida, recorrendo à modelação matemática, foram feitas simulações do estuário do rio Minho, com o auxílio do *software* TELEMAC.

Comparando a onda de maré, na estação de observação em mar aberto (Viana do Castelo) com as do interior do estuário, verificou-se que a maré apresenta uma maior amplitude em Viana do Castelo, como seria de esperar. À medida que se caminha para montante vai diminuindo, de forma marcada desde a Barra até V.N de Cerveira, porém para montante desta localidade, essa diminuição já não é tão notória. Observou-se que a semi-amplitude correspondente à baixa-mar não se desenvolve completamente, principalmente a partir de V.N de Cerveira para montante. Na origem desta irregularidade da curva de maré pode estar a existência de constrangimentos batimétricos desde Vila Nova de Cerveira até à embocadura, fazendo com que o escoamento seja lento no período da vazante, não permitindo que se realize completamente até à baixa-mar. Deste modo, o nível da série tem necessariamente que subir, em direcção a montante.

Igualmente relacionado com constrangimentos batimétricos e com o aumento da não-linearidade originado pela dissipação de energia devido ao atrito, está a distorção da maré da costa para o interior do estuário. Nas representações gráficas das observações verifica-se uma assimetria da curva de maré que se traduz numa diminuição do período de enchente e um aumento do período de vazante, relativamente a uma maré puramente sinusoidal.

Em termos de caudais médios anuais, verifica-se que na Foz do Mouro (estação hidrométrica), os valores registados variam entre 127,2 m<sup>3</sup>/s e 501,2 m<sup>3</sup>/s com um valor médio de 304,9 m<sup>3</sup>/s.

Próximo da zona em estudo, encontra-se a bóia de Leixões a sul e, do lado espanhol a norte existe uma estação de observação no cabo Sillero. As duas estações apresentam a mesma tendência no regime de agitação com direcção predominante dos octantes WNW a NNW.

As correntes são típicas de uma maré semi-diurna, em que a velocidade da vazante é superior à da enchente, a corrente é mais forte na embocadura do que no interior do estuário, como também mais forte em marés vivas do que em marés mortas.

A distribuição da salinidade apresenta uma variação semi-diurna, o que está, em concordância com a variação da maré. De forma geral, a intrusão salina é menor em épocas de maior caudal fluvial e em marés mortas e, é maior em pequenos caudais e em marés vivas.

Nas zonas mais a jusante do estuário os parâmetros hidrológicos são dominados pela maré, enquanto que nas zonas mais a montante são dominados pelo caudal fluvial. Nas zonas intermédias, estes parâmetros são dominados pela maré para baixos caudais. Já quando o caudal é elevado e as marés têm amplitudes pequenas, a força dominante é o caudal fluvial.

Em relação à dinâmica sedimentar, é possível tirar algumas conclusões. Verifica-se que o estuário do rio Minho encontra-se num estado de preenchimento sedimentar relativamente avançado, traduzido pela elevada percentagem da área, desde a embocadura até Vila Nova de Cerveira, situada acima do ZH (cerca de 70%). Esta situação reflecte um processo de assoreamento, determinado pela relativa estabilidade do nível médio da água do mar e pela deposição de materiais de origem fluvial nos últimos milhares de anos. Aliás, a zona entre Caminha e a embocadura está sujeito a um processo contínuo de evolução morfológica, eventualmente cíclica, ao longo de várias décadas.

Desde 1950, têm sido efectuadas diversas intervenções na bacia hidrográfica (construções de barragens, alterações na ocupação do solo) e no estuário (extracção de inertes, dragagens de canais), com possíveis implicações na evolução morfológica do estuário e da zona costeira.

A bacia hidrográfica do rio Minho tem uma grande densidade de aproveitamentos hidroeléctricos na parte espanhola, fazendo desta região, nos dias de hoje, uma das principais regiões produtoras de energia eléctrica em Espanha. Os 34 aproveitamentos hidroeléctricos com capacidade de armazenamento superior a  $1 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, construídos entre 1950 e 1978, contribuíram significativamente para isso. Admite-se que estes aproveitamentos possam ter causado uma diminuição dos picos de cheias e uma redução do fornecimento sedimentar (factor de erosão) na costa.

A construção do modelo revelou-se um processo moroso e delicado, especialmente na definição da batimetria. Foram compilados diversos dados batimétricos cedidos pelo INAG, desde a embocadura até sensivelmente 2 km a montante de Vila Nova de Cerveira. Este processo é uma das etapas mais determinantes para o sucesso do modelo, pois a definição da batimetria induz directamente a qualidade dos resultados obtidos.

Apesar de já ter 5 anos, esta batimetria é o mais recente levantamento efectuado no estuário do rio Minho. Portanto, devido à contínua evolução morfológica, principalmente neste sector do estuário, a simulação pode não reflectir o seu verdadeiro comportamento actual.

O processo de calibração e validação do modelo foi realizado com sucesso, no entanto, julga-se que para uma obtenção de dados mais realista seria necessária a batimetria da zona exterior do estuário. Contudo, os resultados foram bastante satisfatórios, excedendo as expectativas.

As simulações confirmam e complementam a informação recolhida sobre as características do estuário apresentadas. Por exemplo, em relação à propagação da maré no interior do estuário, verifica-se igualmente a distorção da maré e as diferentes influências, desta e do caudal fluvial ao longo do estuário.

Devido à inexistência de dados de caudais anteriores à construção das barragens, as alterações do regime fluvial, e os seus efeitos na evolução morfológica do estuário, são difíceis de quantificar. Embora se considere que a construção das barragens não terá sido determinante para as condições de assoreamento observadas, os resultados da modelação indicam que a alteração associada à diminuição dos caudais de cheia, podem ter tido implicações significativas na dinâmica sedimentar. Pois as simulações demonstram que um caudal de cheia, origina um volume significativo de sedimentos transportados em todo o estuário, e para o seu exterior. Desta forma, para além de poder estar relacionada com as dragagens do *ferry*, a erosão das praias de Camposancos e de Molino, na margem

espanhola, pode também ser justificada pela diminuição das velocidades associadas aos caudais de cheia.

## **5.2. RECOMENDAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS**

No seguimento do estudo realizado, são apresentadas algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros com vista a complementar os resultados obtidos neste estudo. Salientam-se as que se relacionam com as limitações do actual estudo e outras que poderão alargar o seu âmbito.

Em relação ao estuário do rio Minho, este trabalho contribui para um melhor conhecimento das características deste estuário e dos problemas nele existentes.

Verifica-se que o uso da modelação para a caracterização do estuário serve como complemento à informação recolhida e que aliás tem a vantagem de simular o estuário em situações para as quais não existem medições efectuadas no local. No entanto, uma das limitações está relacionada com a não disponibilidade dos dados batimétricos da parte exterior do estuário, de forma a obterem-se melhores resultados na zona da embocadura. Desta forma, como trabalho subsequente, e como complemento a este estudo, seria de efectuar a modelação com esse dados.

Apesar do esforço efectuado no sentido de colmatar a falta de informação relativa ao real volume de sedimentos depositados permanece, nos dias de hoje, desconhecida a real capacidade das albufeiras Espanholas. Com vista a melhorar os conhecimentos nesta matéria, recomenda-se um estudo intensivo ao regime de exploração dos aproveitamentos hidráulicos da parte espanhola.

Finalmente, outro aspecto importante e útil a fim de melhorar o conhecimento da morfodinâmica do estuário do rio Minho, seria efectuar uma campanha de medição do transporte de sedimentos.



## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- Abreu, A.L. (2010). *Avaliação do Potencial Energético das Marés no Estuário do Rio Douro*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Balsinha, M.J., Santos, A.I., Alves, A.M.C., Oliveira, A.T.C. (2009). *Textual Composition of Sediments from Minho and Douro Estuaries (Portugal) and its Relation with Hydrodynamics*. Journal of Coastal Research, IS 56, p.1330-1334.
- Bell, R., Green, M., Hume, T., Gorman, R. (2000). *What Regulates Sedimentation in Estuaries?*. Water & Atmosphere 8 (4), 13-16.
- Boletim do Instituto Hidrográfico. *Projecto ECOIS*. Hidromar nº 91, II série, Dezembro 2005, p. 8-9, Editor, Lisboa.
- Cardoso da Silva, M. (2000). *Estuários-Critérios para uma Classificação Ambiental*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Jan/Mar 2000, 25-35, Volume 5 n.1.
- Confederación Hidrográfica del Miño-Sil (2007). *Estudio General sobre la Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil*. [http://www.chminosil.es/chms/documentos/file/planificacion/documentos\\_iniciales/01\\_Estudio\\_General\\_Demarcacion.pdf](http://www.chminosil.es/chms/documentos/file/planificacion/documentos_iniciales/01_Estudio_General_Demarcacion.pdf).
- Confederación Hidrográfica del Miño-Sil (a). *Marco Físico*. <http://www.chminosil.es/contenido.php?mod=0&id0=2&id1=44>. (26/03/11)
- Confederación Hidrográfica del Miño-Sil (b). *Estado de los Embalses*. <http://www.chminosil.es/contenido.php?mod=6&id0=3&id1=93>.
- Costa, A.L.R. (2005). *O Assoreamento das Albufeiras das Barragens Hidroeléctricas e a “Erosão” das Praias (uma contribuição para o conhecimento dos seus sedimentos)*. Dissertação de Mestrado Universidade do Minho.
- Dronker, J., (1986). *Tidal Asymmetry and Estuarine Morphology*. Netherlands Journal of Sea Research, 20 (2/3), 117-131.
- Faria, C.S.G. (2009). *Previsão da Agitação Marítima na Costa Noroeste Portuguesa – Implementação do Modelo SWAN*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Forrester, W.D. (1983). *Canadian Tidal Manual*. Departement of Fisheries and Oceans, Canadian Hydrographic Service, Ottawa, 138p.
- Frazão, E.P. (2003). *Caracterização Hidrodinâmica e Morfosedimentar do Estuário Pontengi e Áreas Adjacentes: Subsídios para Controle e Recuperação Ambiental no Caso de Derrames de Hidrocarboneto*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra.
- Gallo, M.N. (2004). *A Influência da Vazão Fluvial sobre a Propagação da Maré no Estuário do Rio Amazonas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Gil, A.B. (2008). *Contributos para a Navegação Fluvial em Portugal*.
- Gil, A.B. (2009). *Navegação Fluvial em Portugal – O Aproveitamento dos Principais Rios*. Revista de Marinha, 19/06/09.
- Godin, G. (1999). *The Propagation of Tides up Rivers with Special Consideration on the Upper Saint Lawrence River*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 48, 307-324, Ottawa.

- Gomes, F.V., Pinto.F.T., Neves, L., Barbosa, J.P. (2006). *Eurosion: Pilot Site of River Douro – Cape Mondego and Case Studies of Estela, Aveiro, Caparica, Vale de Lobo and Azores*. Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos, Faculdade de Engenharia do Porto.
- Hervouet, J.M., (2000). *The TELEMAC modelling system: an overview*. Hydrological Processes. 14 (13), 2209-2210.
- Hervouet, J.M., Bates, P., (2000). *The TELEMAC modelling system, special issue*. Hydrological Processes. 14 (13), 2207-2208.
- Hidromar (2005). *Projecto ECOIS*. Boletim do Instituto Hidrográfico. Hidromar nº91, II série, Dezembro 2005.
- Hoven, L.E. (2010). *Three-dimensional numerical modelling of sediments in water reservoirs*. Dissertação de Mestrado, Norwegian University of Science and Technology.
- Hume, T., Swales, A. (2003). *How estuaries grow old*. p.11-12. Water & Atmosphere 11 (1).
- Instituto da Água. (2000). *Plano de Bacia Hidrográfica do Rio Minho*. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território
- Lameiro, L.F (2009). *Sedimentação em Albufeiras e Estudo da Possibilidade de Utilização dos Sedimentos em Alimentação Artificial de Praias*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia do Porto.
- LNEC (2007). *Estudo do Problemas de Assoreamento e Erosão no Estuário do Rio Minho*. Relatório 1: Informação de Base e Evolução Morfológica Recente, Lisboa.
- LNEC (2007). *Estudo do Problemas de Assoreamento e Erosão no Estuário do Rio Minho*. Relatório 2: Modelação da Hidrodinâmica, da Salinidade e da Dinâmica Sedimentar, Lisboa.
- Mensacal, Y. (sem data). *Use of TELEMAC software system as a technical modelling tool for coastal zone development studie*. SOGREAH Eau – Energie – Environnement 6.
- Miranda, L.B., Castro, B.M., Kjerfve.,B (2002). *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. Editor da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Moura, M.J., (1990). *A Bacia Hidrográfica do Rio Minho*. Monografias sobre as Bacias Hidrográficas do Norte de Portugal. Projecto de Gestão Integrada dos Recursos Hídricos do Norte.
- Nicholls, P., (2002). *Sediment dumps in estuaries: filling in the gaps with a risk map*. Water & Atmosphere 10 (4).
- Oberrecht (sem data(a)), K. *Mixing Fresh and Salt Water*. South Slough National Estuarine Research Reserve, <http://www.oregon.gov/DSL/SSNERR/docs/EFS/EFS33mix.pdf>
- Oberrecht (sem data(b)), K. *Sediment Transport and Deposition*. South Slough National Estuarine Research Reserve, <http://www.oregon.gov/DSL/SSNERR/docs/EFS/EFS32sediment.pdf>
- Pereira dos Reis, P.A. (2007). *Estudo Geoquímico de Metais em Sedimentos do Sapal dos Rios Minho e Coura*. Mestrado em Ciências do Mar - Recursos Marinhos, Instituto de Ciências Biomédicas Abel Salazar.
- Plan Hidrológico Miño-Sil. (2010-2015). *Resumen divulgativo del Proyecto del Plan Hidrológico 2010-2015 de la Demarcación Hidrográfica del Miño-Sil*. Confederación Hidrográfica del Miño-Sil. [http://www.chminosil.es/chms/documentos/file/plan\\_hidrologico/pub\\_cast\\_def.pdf](http://www.chminosil.es/chms/documentos/file/plan_hidrologico/pub_cast_def.pdf).

- Portela, L.I., (2011). *Evolução Morfológica, Hidrodinâmica e Dinâmica Sedimentar do Estuário do rio Minho*. 3º Seminário sobre Gestão de Bacias Hidrográficas “Os Estuários”, 2 e 3 de Junho 2011, Viana do Castelo, páginas, Núcleo Regional do Norte da Associação dos Recursos Hídricos.
- Puertos del Estado. *Clima Medio de Oleaje*. [http://w3.puertos.es/es/oceanografia\\_y\\_meteorologia/banco\\_de\\_datos/oleaje.html](http://w3.puertos.es/es/oceanografia_y_meteorologia/banco_de_datos/oleaje.html). 09/05/11.
- Reis, J.L (2008). *Caracterização da Maré no Estuário do Minho*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos, Instituto Superior Técnico.
- Reis, J.L., Martinho, A.S., Pires Silva, A.A., Silva, A.J. (2009). *Assessing the influence of the discharge on the Minho estuary tidal regime*. Journal of Coastal Research, IS 56.
- Santos, A.I., Balsinha, M.J., Oliveira, A., da Silva, A.J. (2006). *Tide Includes Variability in the Hydrography and Dynamics of the Minho and Douro Estuaries during Low Runoff*. 5º Simposio sobre el Margen Ibérico Atlántico (Editor A., ed.).
- Santos, A.I., Balsinha, M.J., Oliveira, A., da Silva, A.J. (2009). *A Estrutura Longitudinal Hidrológica dos Estuários do Douro e Minho Observadas durante o Projecto ECOIS (2005-2007)*. 6º Simposio sobre el Margen Ibérico Atlántico (Editor A., ed.), 1-5 de dezembro de 2009, Oviedo, p. 161-164, Editora, Cidade de publicação.
- Scapin, J., Paiva, J.B.D., Beling, F.A. (2007). *Avaliação de Métodos de Cálculo do Transporte de Sedimentos em um Pequeno Rio Urbano*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Out/Dez 2007, p. 05-21.
- Sousa, R. G. (2003). *Estrutura das Comunidade de Macroinvertebrados bentónicos presentes no estuário do rio Lima*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Ciências Biomédicas de Abel Salazar.
- Souza, F.E.S. (2004). *Evolução Morfodinâmica da Região de Influência Estuarina do Rio Curimataú/rn, com Ênfase nas Alterações do Ambiente Depositional de Manguezal e a Integração de Geodados em Sig*. Dissertação de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra.
- Speer, P.E., Aubrey, D.G., Friedrichs, C.T. (1991). Non-linear hydrodynamics of shallow tidal inlet/bay systems. In *Tidal Hydrodynamics*, Parker, B.B., 297-320, John Wiley & Sons, inc, Rockville (Maryland).
- Swales, A., Oldman, J., Radford, J., MacDonald, I. (2003). *What happens in estuaries during floods?* Water & Atmosphere 11 (1).
- Tomczak, M., (1996). *Definition of estuaries; empirical estuary classification*. <http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/ShelfCoast/chapter11.html>.
- Tomczak, M., (1996-2000). *Tides in Shallow seas and estuaries*. <http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/ShelfCoast/chapter05.html>
- Tomczak, M., (2000). *Sediment Transport in estuaries*. <http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/ShelfCoast/chapter17.html>
- Universidad de Cantabria (1996). *Estudio Previo de la Desembocadura del Miño. Efecto de las Obras en el Entorno*. Ministerio de Medio Ambiente.
- Univesidade de Coimbra, (2009). *Departamento de Botânica*. Biologia e Ecologia. Aula Teórica 28-09-2009. <https://woc.uc.pt/botanica/getFile.do?tipo=2&id=4301>

Univesidade Federal da Bahia. *Curso de Graduação em Oceanografia*. Sedimentologia. Aula 13 Estuários. [http://www.oceanografia.ufba.br/ftp/Sedimentologia/Aula\\_13\\_Estuarios.pdf](http://www.oceanografia.ufba.br/ftp/Sedimentologia/Aula_13_Estuarios.pdf)

Woodroffe, C.D. (2003). *Coasts – form, process and evolution*. Cambridge university press, Cambridge.

Yordi, L., Carreño, A. (1967). *Presas de Velle, Castrelo y Frieira*. Revista de Obras Pública, Agosto 1967, p. 889 – 906. [http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1967/1967\\_tomoI\\_3028\\_21.pdf](http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1967/1967_tomoI_3028_21.pdf).

Zacarias, N.G.R. (2007). *Influência da Batimetria e do Caudal Fluvial na Propagação da Maré no Estuário do rio Minho*. Licenciatura em Ciências do Ambiente Ramo Qualidade do Ambiente, Universidade de Évora.

[www.telemacsystem.com](http://www.telemacsystem.com) 26/06/11

[www.eos.ubc.ca/~rich/#T\\_Tide](http://www.eos.ubc.ca/~rich/#T_Tide) 01/07/11

[www.inag.pt](http://www.inag.pt) 09/04/11.

## BIBLIOGRAFIA REFERIDA

Alves, A.M.C. (1996). *Causas e processos da dinâmica sedimentar na evolução actual do litoral do Alto Minho*. Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho, Braga.

Boyd, R., Dalrymple, R., Zaitlin, B.A. (1992). *Classification of clastic coastal depositional environments*. *Sedimentary Geology*, 80: 139-150.

Chappell, J., Woodroffe, C.D. (1994). *Macrotidal estuaries*.

Dias, J.M.A., Boski T. (1997). *Evidence of rapid change in coastal features in Portugal during the last millenium*. IGCP project 367 (Late Quaternary Coastal Records of Rapid Change: Application to Present and Future condition) Abstracts related to the Mediterranean and Black Sea Region. MBSS Newsletter 19:86-88.

Carvalho, J.J.R., Barceló, J.P. (1966), *Agitação Marítima na Costa Oeste de Portugal Metropolitano — Contribuição para o seu Estudo*. Memória N° 290, LNEC, Ministério das Obras Públicas, Lisboa.

CEDEX (1998). *Estudio de variables ambientales en el tramo onubense del río Guadiana*. El medio abiótico. CEDEX, Madrid.

CEDEX (2004). *Estudio integral del estuario del rio Miño. Informe final*. CEDEX, Informe técnico para Ministerio de Medio Ambiente.

CIL (1987). *Reunião plenária de 15, 16 e 17 de Junho de 1987*. Comissão Internacional de Limites entre Portugal e Espanha.

Consulmar (1990). *Terminal de ferry-boats em Caminha. Estudo de localização*. Volume 3 – Anexo II: Estudos de hidrodinâmica e sedimentologia. Estudo realizado para a Comissão de Coordenação da Região Norte.

Cooper, J.A.G. (1993). *Sedimentation in a river dominated estuary*. *Sedimentology*, 40: 979-1017.

Dalrymple, R.W., Zaitlin, B.A., Boyd, R. (1992). *Estuaries facies models: conceptual basis and stratigraphic implications*. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62: 1130-1146.

Dyer, K.R. (1973). *Estuaries: A Physical Introduction*. London, Wiley. 140p.

Fairbridge, R.W. (1980). *The Estuary: Its Definition and Geodynamic Cycle*.

- Iglesias, M.T.P (1990). *En torno a la prohibición de extracción de áridos en el tramo internacional del Rio Miño*. Revista Española de Derecho Internacional 42 (1), 321-324.
- Instituto Hidrográfico (1978). Barra e Porto de Caminha, 1977, Carta 51 (fólio antigo), escala 1:10.000, edição: Novembro de 1978, reimpressão: Março de 1988.
- Kjerfve, B. (1987). *Estuarine Geomorfology and Physical Oceanography*.
- Lencastre, A., Franco, F. M. (2006). *Lições de Hidrologia*, Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica.
- Loureiro, A. (1904). *Os portos marítimos de Portugal e ilhas adjacentes*. Imprensa Nacional, Lisboa.
- Lysne, Dagfinn, Glover, Brian, Støle, Håkon, Tesaker, Einar (2003). Sediment transport and sediment handling. In *Hydraulic Design*, páginas 117-155, Norwegian University of Science and Technology Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Trondheim, Noruega.
- Magalhães, F.M.Q. (2001). *Os sedimentos da plataforma continental portuguesa: contrastes espaciais, perspectiva temporal, potencialidades económicas*. Instituto Hidrográfico, Documento Técnico 34, Lisboa.
- Mao, Q., Shi, P., Yin, K., Gan, J., Qi, Y. (2004). *Tides and tidal currents in the Pearl River Estuary*. Continental Shelf Research 24, 1797-1808.
- Officer, C.B. (1983). *Physics of Estuarine Circulation*.
- Pritchard, D.W. (1967). *What is an Estuary: Physical View Point*.
- Stigter, C., Post, G. R., Keyser, D. J., Strand, R. I. (1989). *Sedimentation Control of Reservoirs*, Comissão Internacional das Grandes Barragens (ICOLD), Paris.
- Wells, J.T. (1995). *Tide-dominated estuaries and tidal rivers*.



# Anexos

CAUDAL DE VERÃO EM MARÉ VIVA – SETEMBRO DE 2005

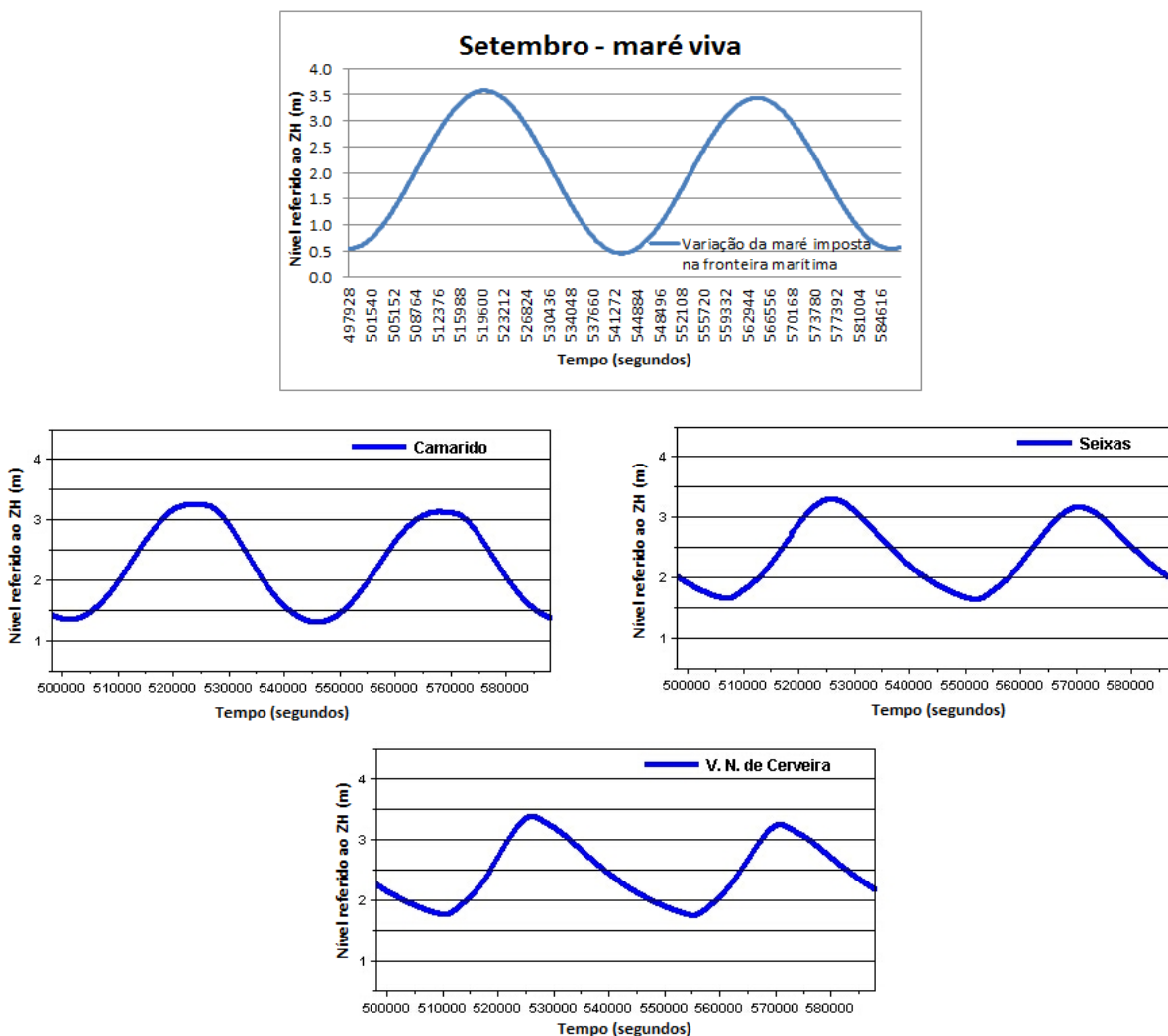
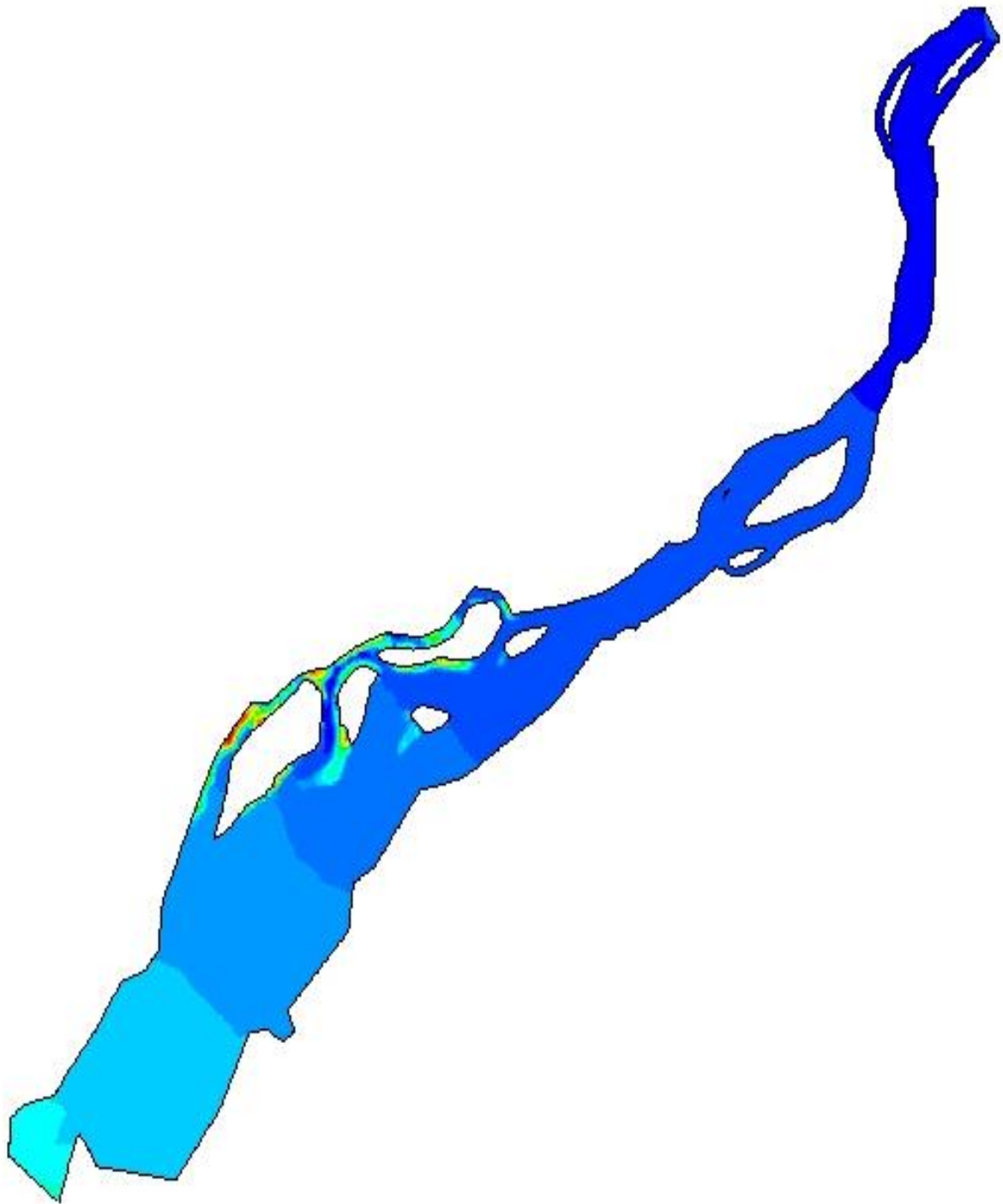


Fig.1 – Propagação da maré viva em Setembro de 2005: a) imposta na fronteira marítima; b) Camarido; c) Seixas; d) V. N. de Cerveira.

Tabela 1 – Instantes em que foram apresentados resultados para a superfície livre, campos de velocidades e transporte de sedimentos.

<b>Caudal = 91,96 m³/s</b>	Instante (segundos)
<b>Superfície livre/Campos de velocidades</b>	
enchente	514800
fim da enchente	526080
vazante	541200
fim da vazante	550800
<b>Transporte de sedimentos</b>	
enchente	515280
vazante	530400



**Superfície livre (m)**

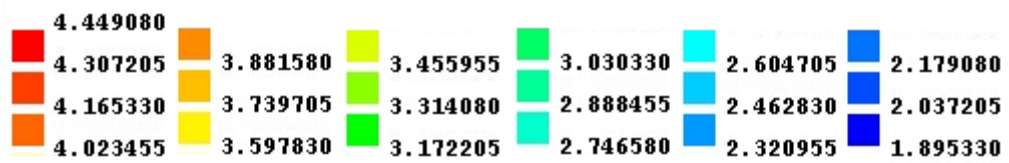


Fig.2 – Superfície livre na enchente – 514800 segundos.

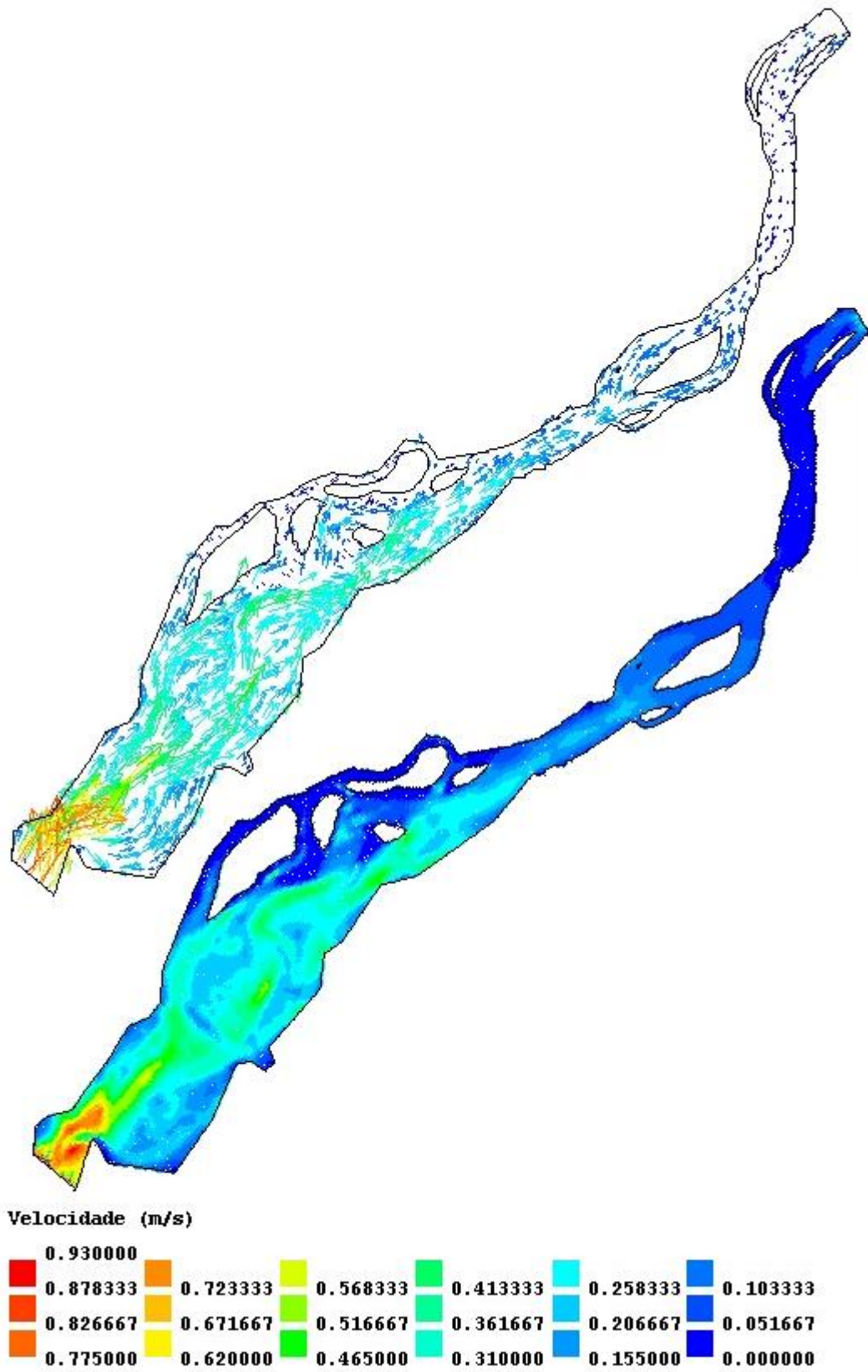


Fig.3 – Campo de velocidades na enchente – 514800 segundos.

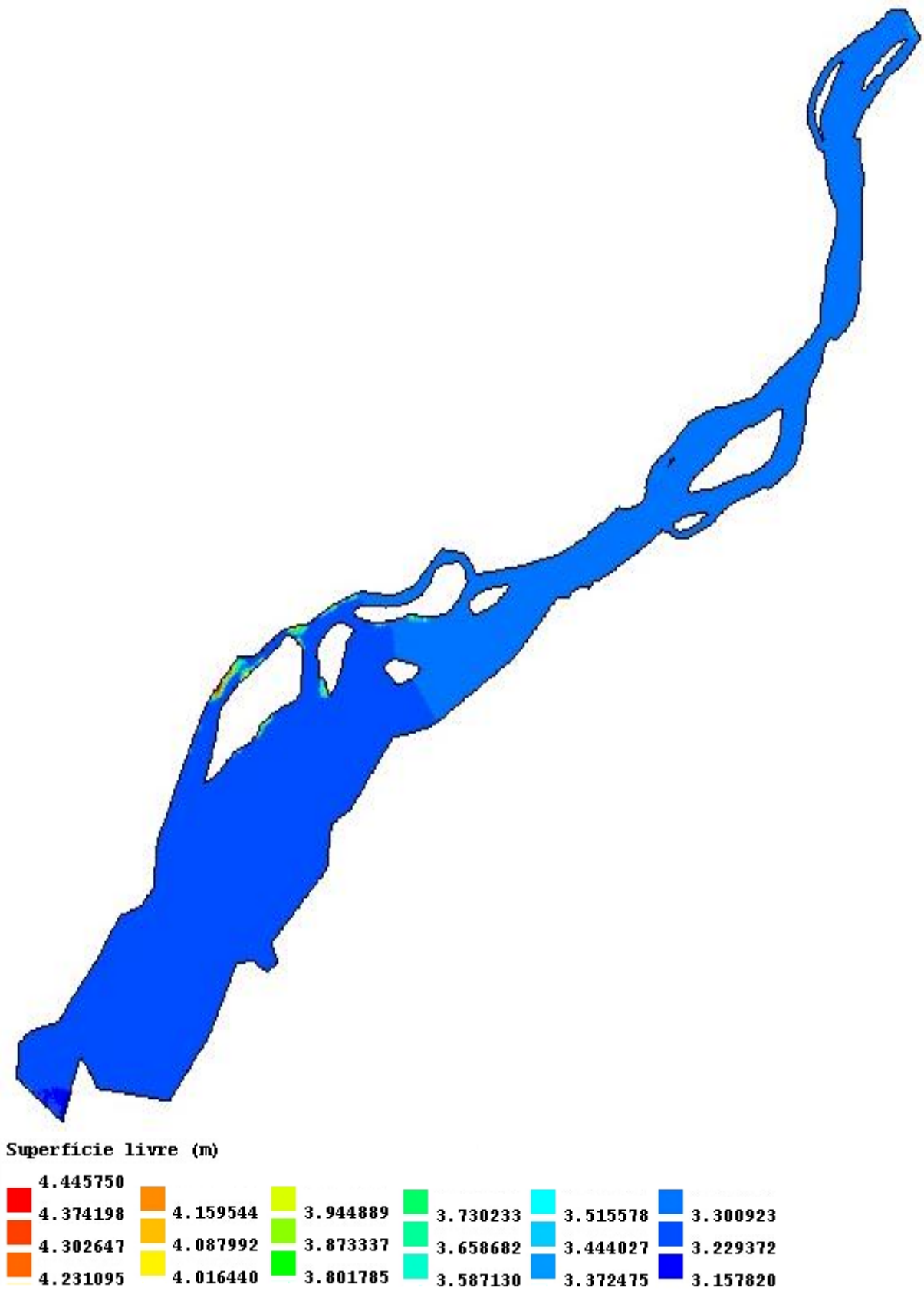


Fig.4 – Superfície livre no final da enchente – 526080 segundos.

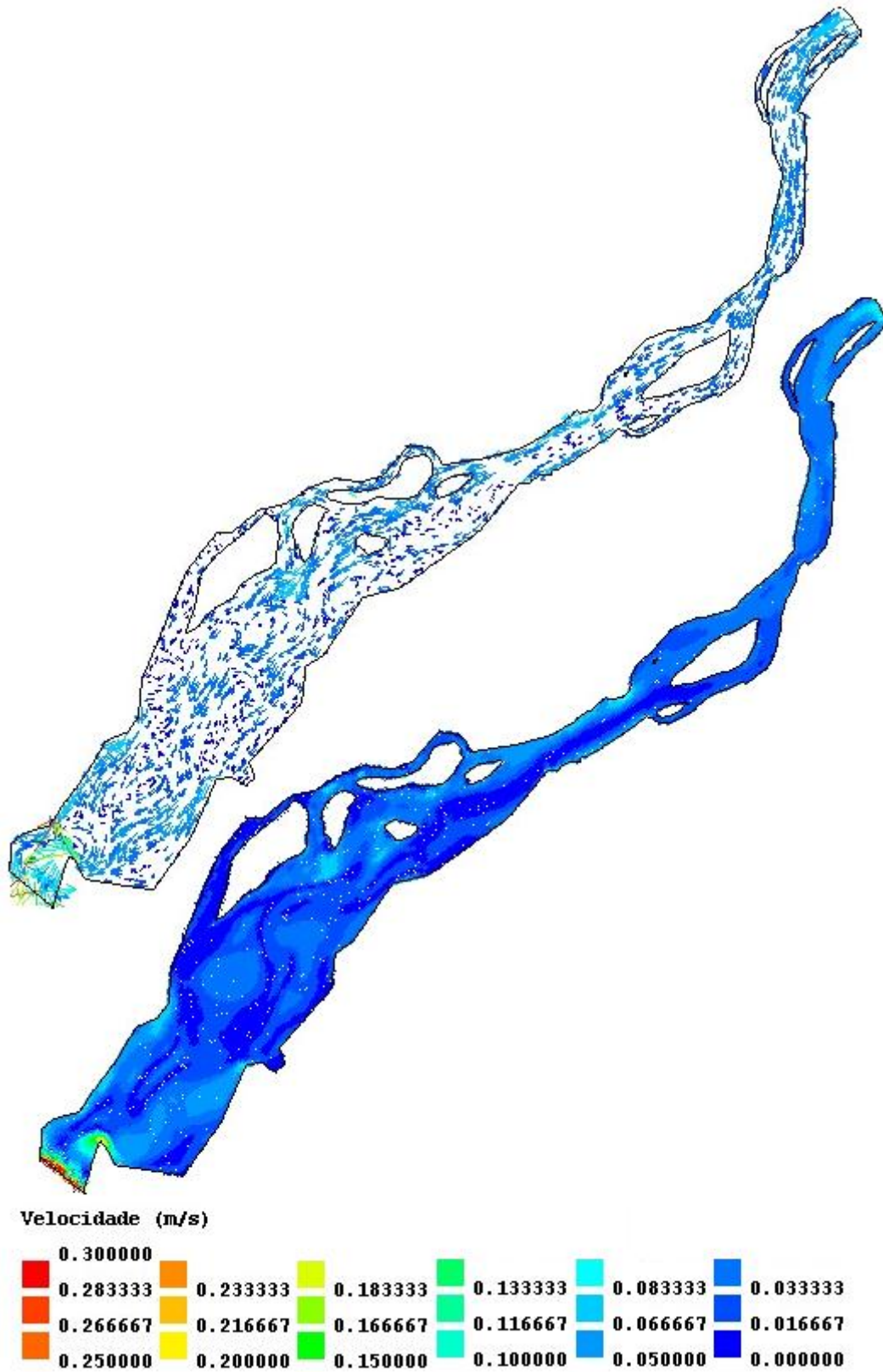
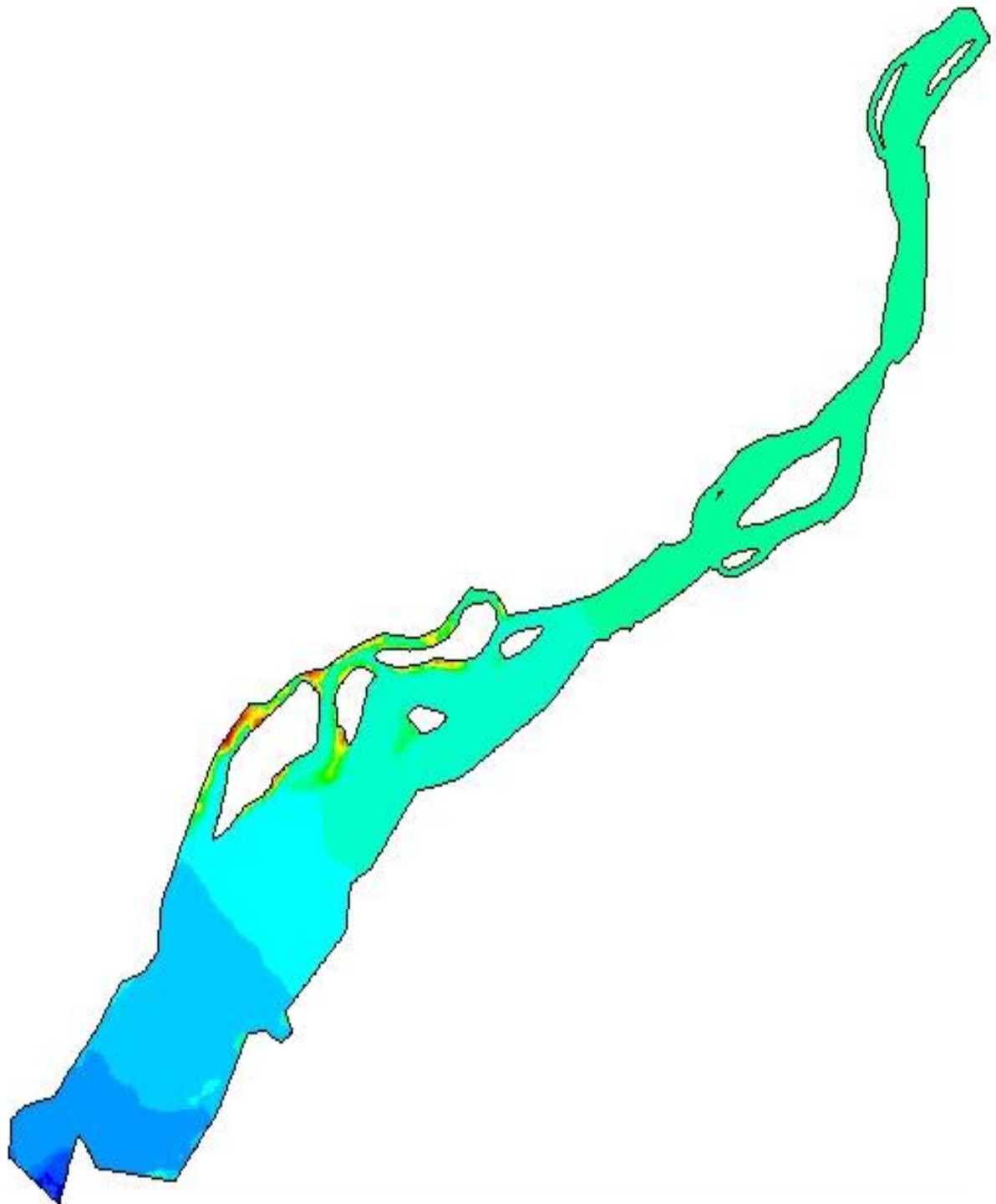


Fig.5 – Campo de velocidades no final da enchente – 526080 segundos.



Superfície livre (m)

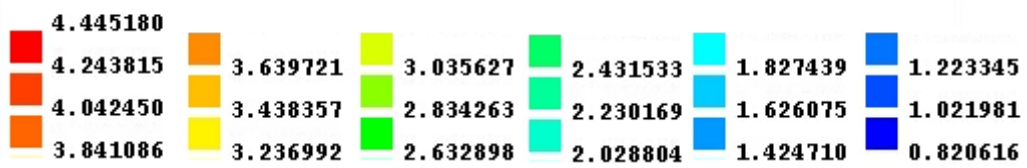


Fig.6 – Superfície livre na vazante – 541200 segundos.

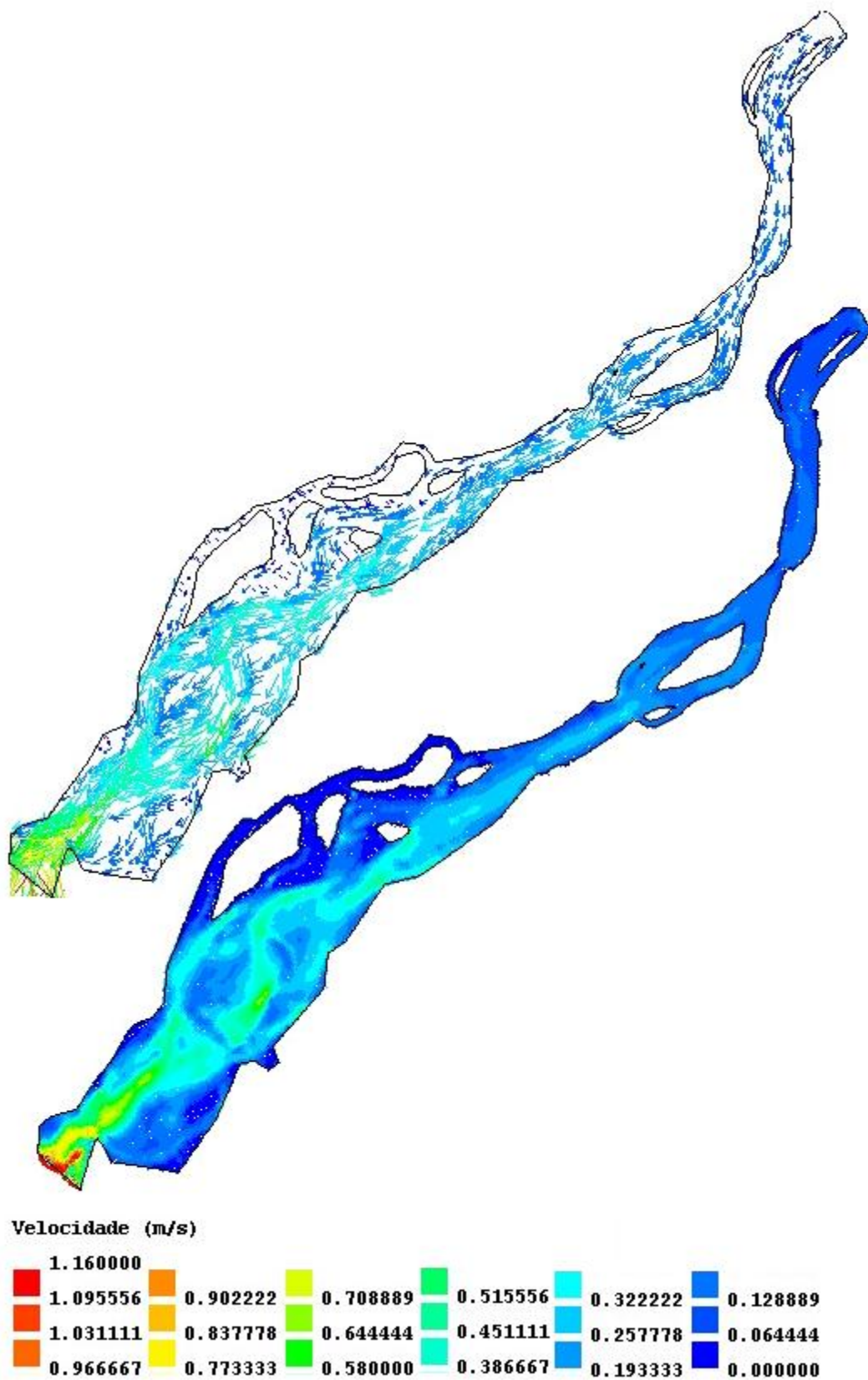
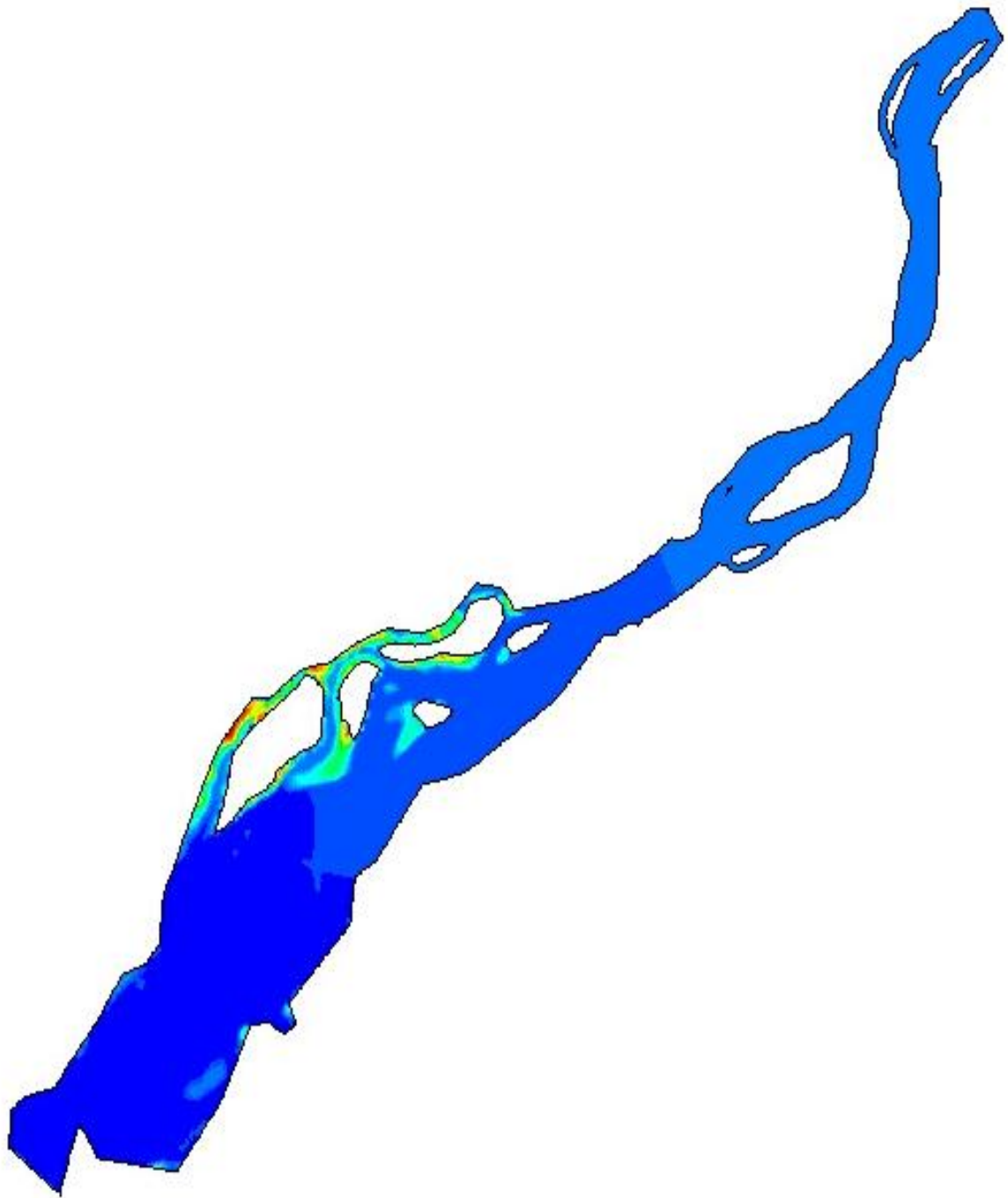


Fig.7 – Campo de velocidades na vazante – 541200 segundos.



Superfície livre (m)

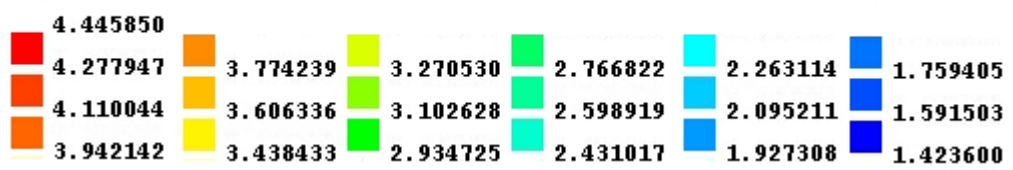


Fig.8 – Superfície livre no final da vazante – 550800 segundos.

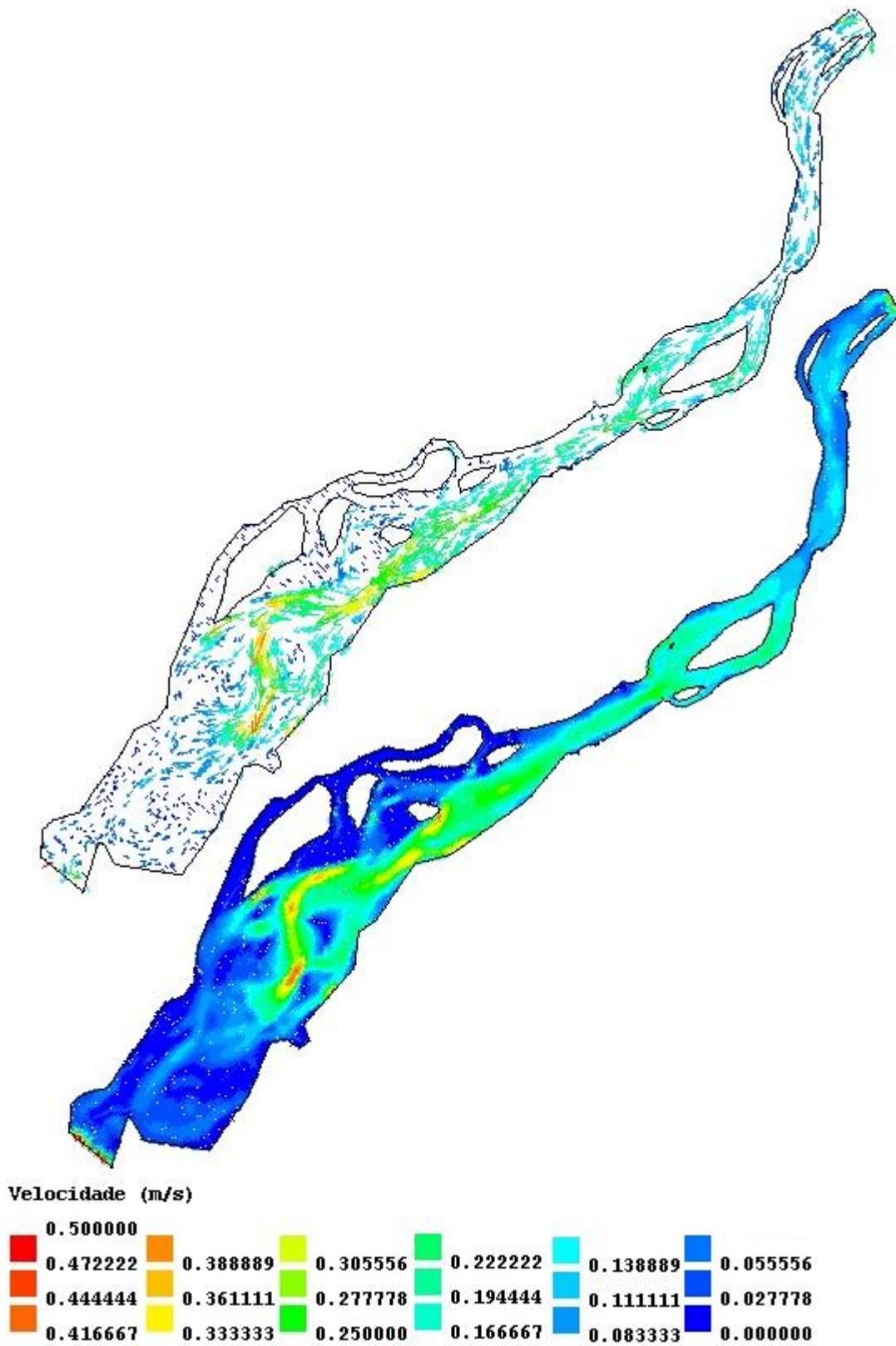


Fig.9 – Campo de velocidades no final da vazante – 550800 segundos.

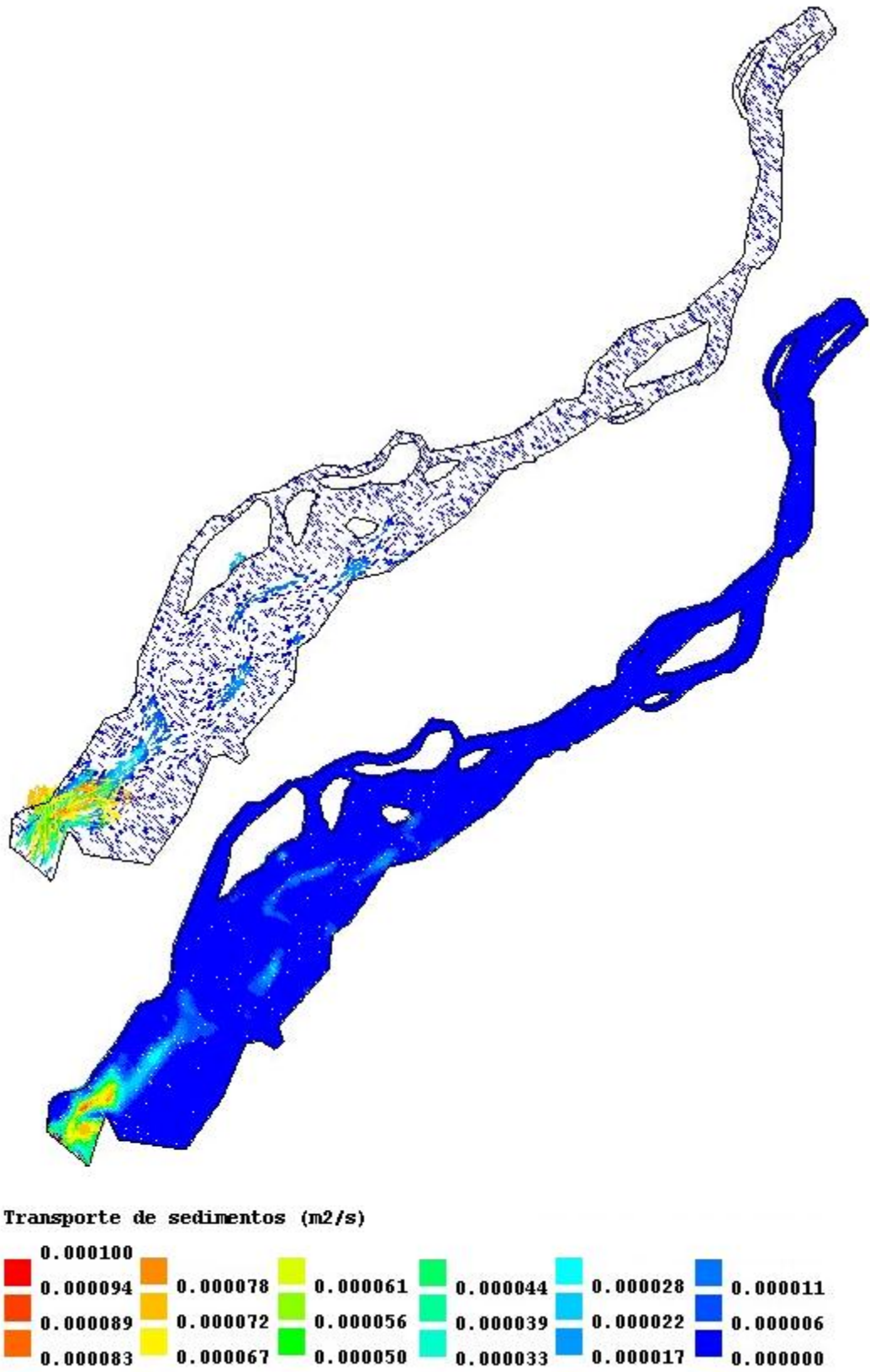


Fig.10 – Transporte de sedimentos na enchente – 515280 segundos.

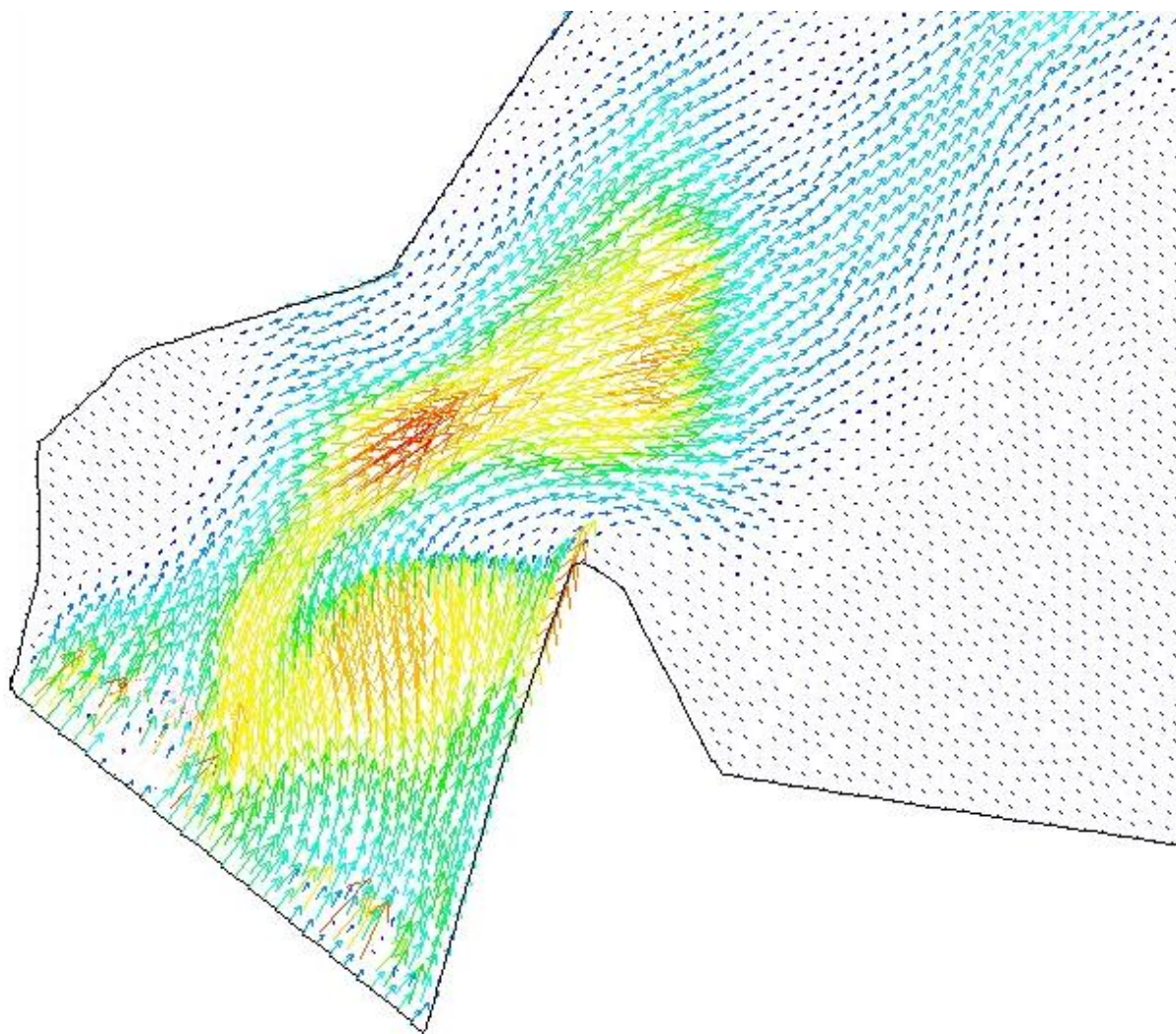


Fig.11 – Pormenor do transporte de sedimentos na embocadura durante a enchente – 515280 segundos.

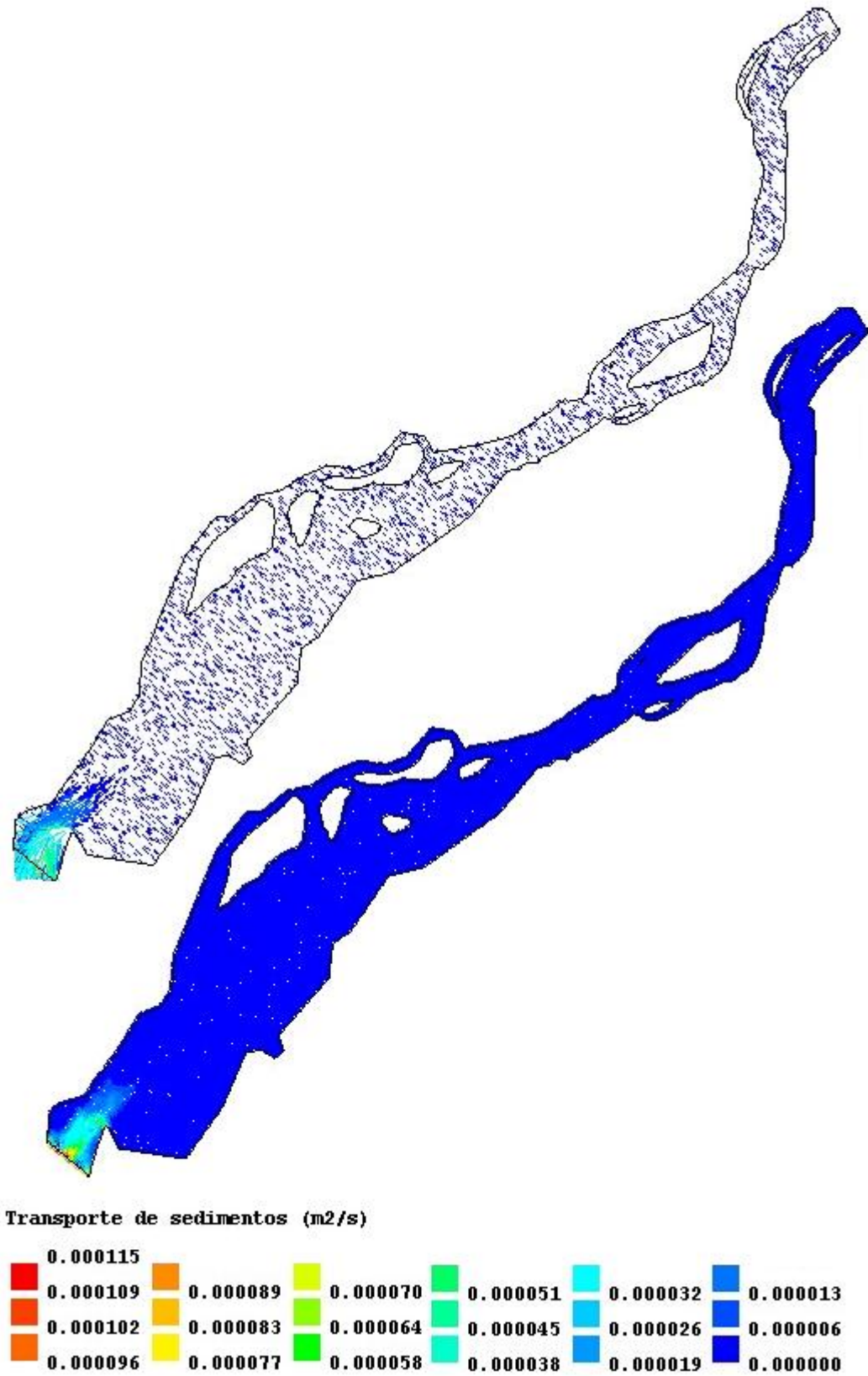


Fig.12 – Transporte de sedimentos na vazante – 530400 vazante

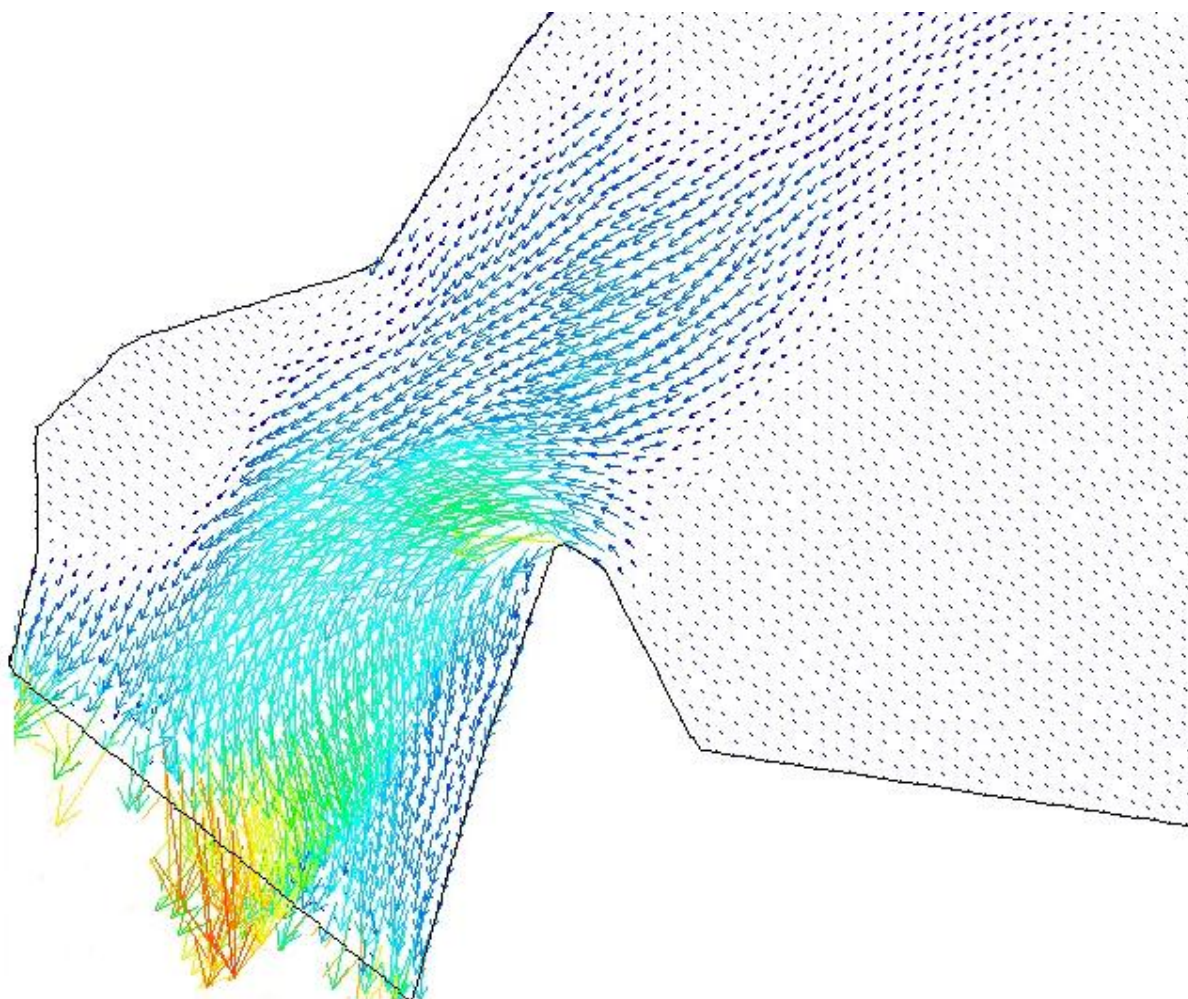


Fig.13 – Pormenor do transporte de sedimentos na embocadura durante a vazante – 530400 segundos.

CAUDAL DE VERÃO EM MARÉ MORTA – SETEMBRO DE 2005

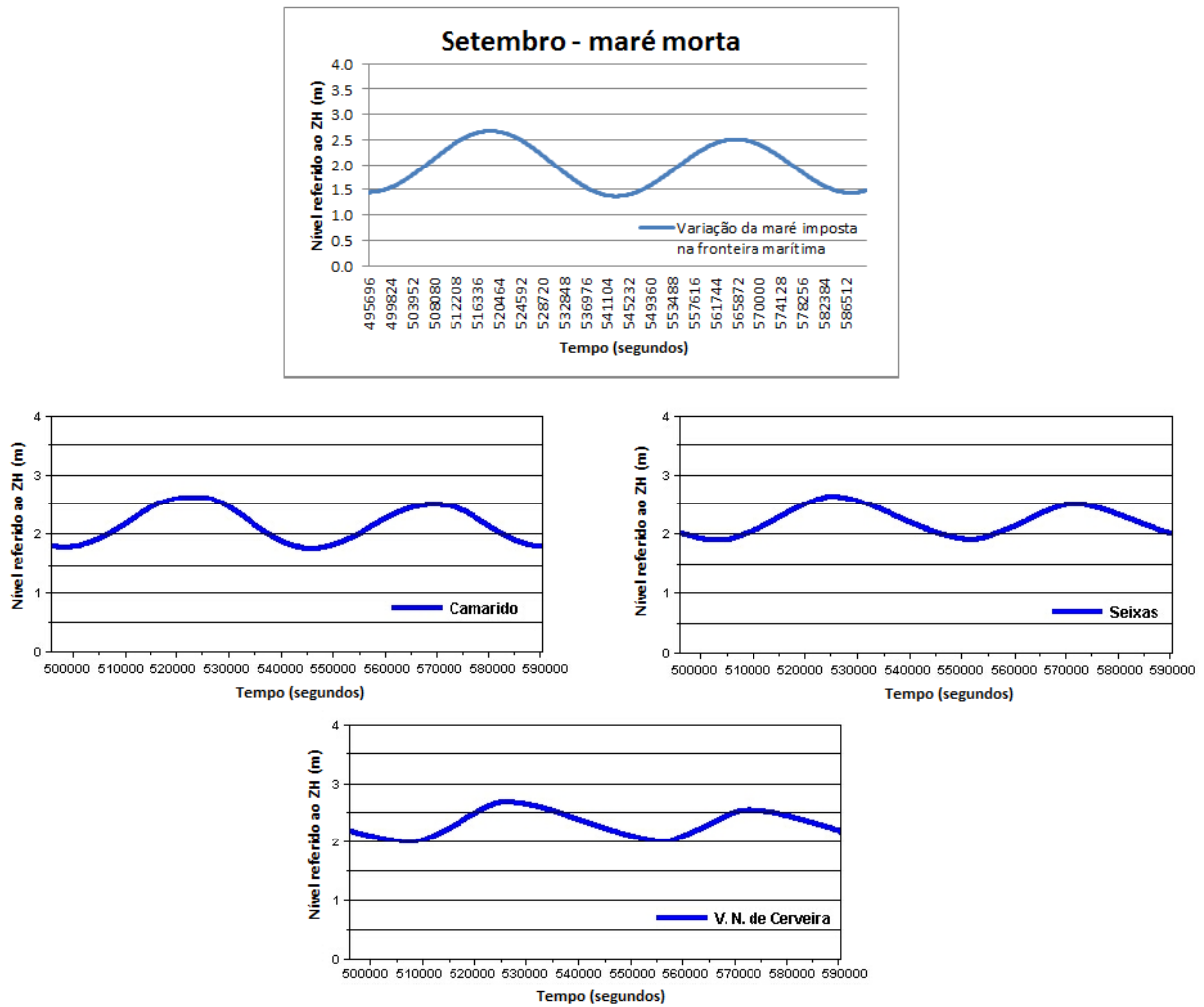
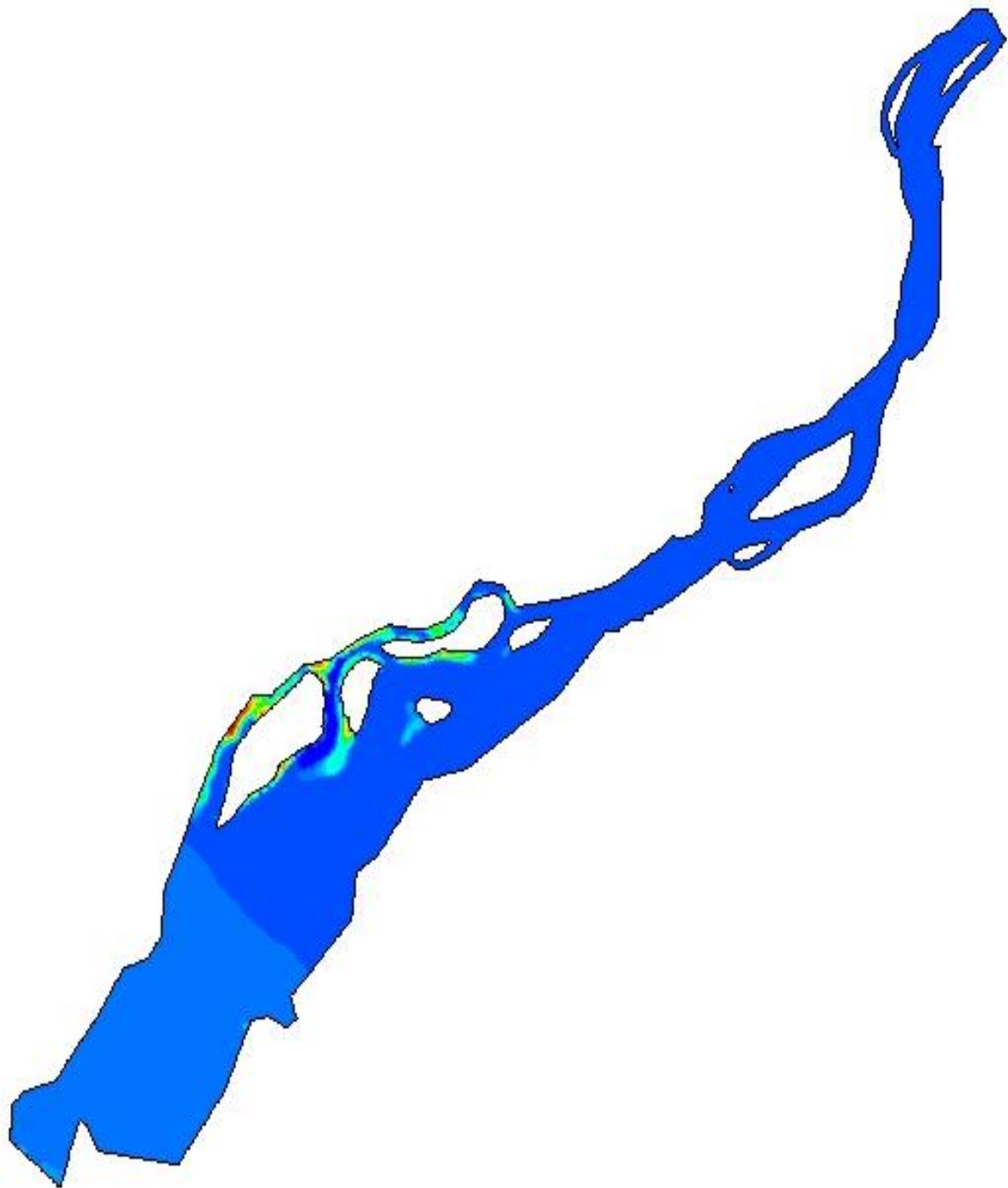


Fig.14 – Propagação da maré morta em Setembro de 2005: a) imposta na fronteira marítima; b) Camarido; c) Seixas; d) V. N. de Cerveira.

Tabela 5.2 – Instantes em que foram apresentados resultados para a superfície livre, campos de velocidades e transporte de sedimentos.

<b>Caudal = 91,96 m<sup>3</sup>/s</b>	Instante (segundos)
<b>Superfície livre/Campos de velocidades</b>	
enchente	516000
fim da enchente	524400
vazante	536400
fim da vazante	551040
<b>Transporte de sedimentos</b>	
enchente	516240
vazante	535680



Superfície livre (m)

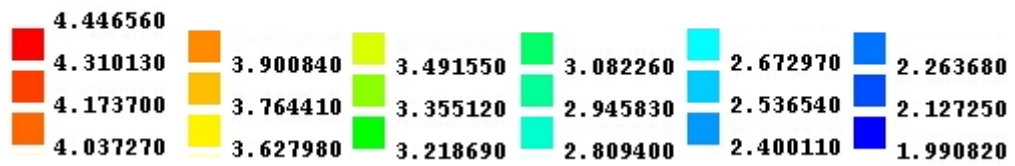


Fig.15 – Superfície livre na enchente – 516000 segundos.

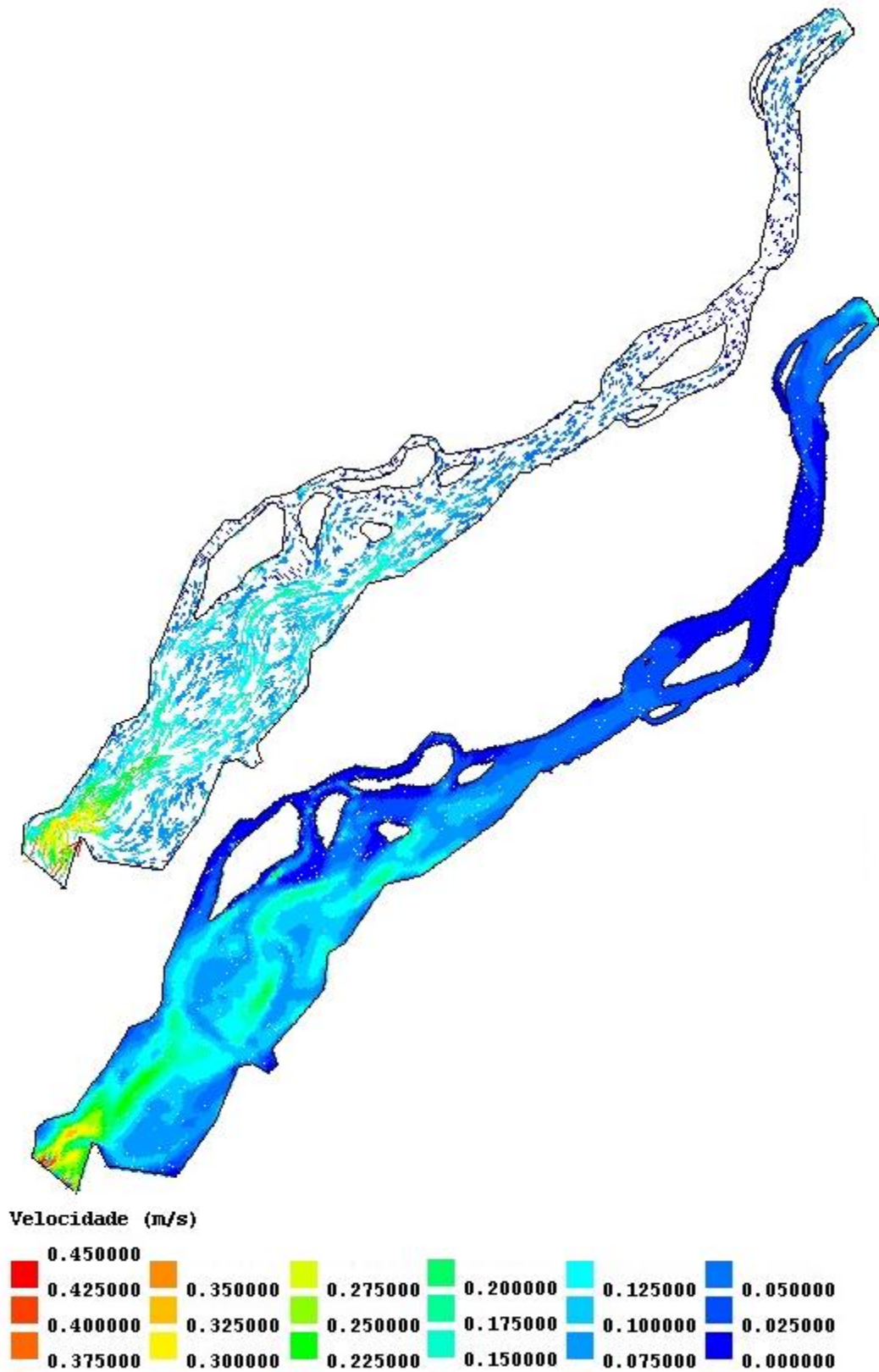
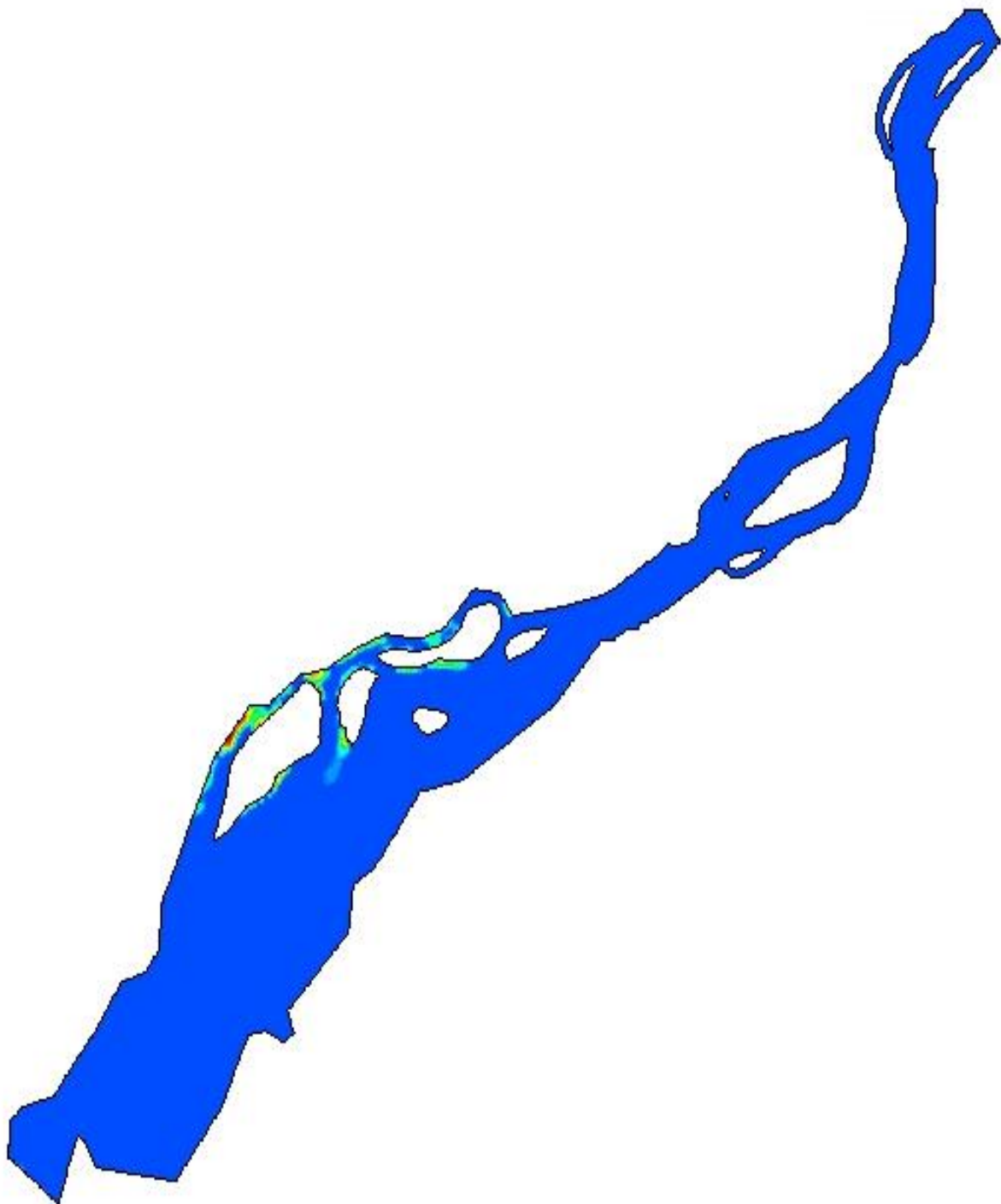


Fig.16 – Campo de velocidades na enchente – 516000 segundos.



Superfície livre (m)

4.445850					
4.335018	4.002521	3.670024	3.337528	3.005031	2.672534
4.224185	3.891689	3.559192	3.226696	2.894199	2.561702
4.113353	3.780857	3.448360	3.115863	2.783367	2.450870

Fig.17 – Superfície livre no final da enchente – 524400 segundos.

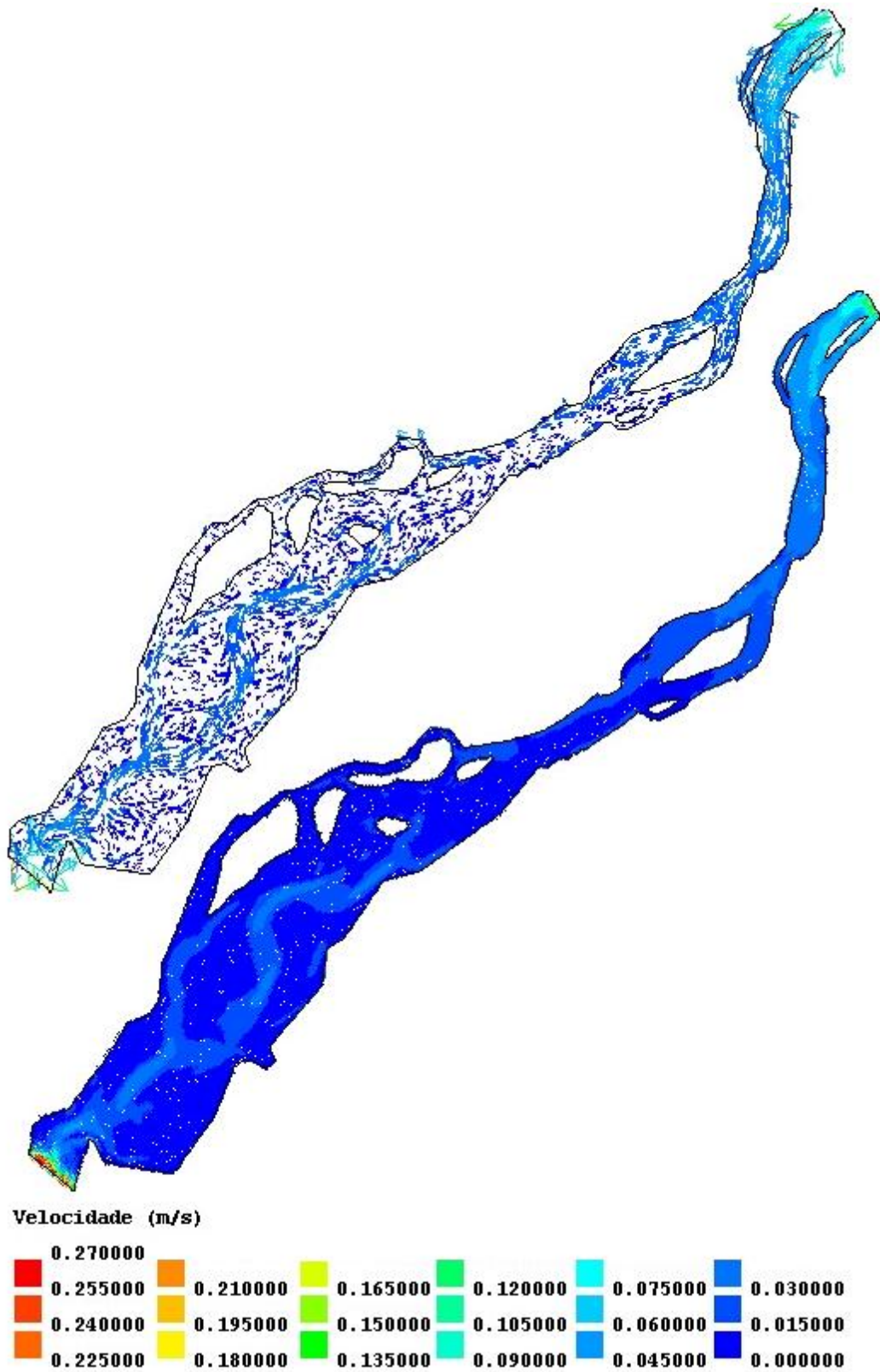
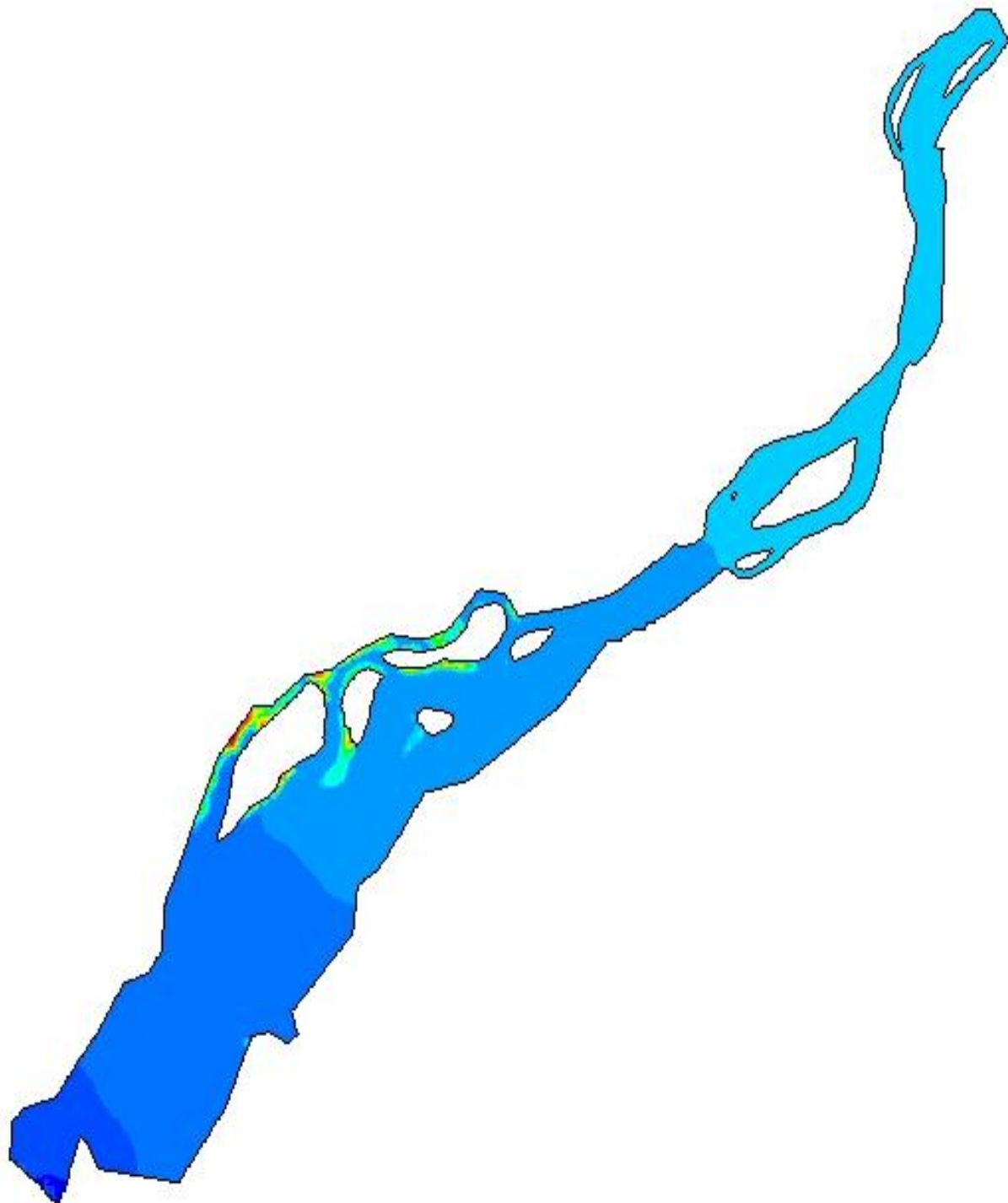


Fig.18 – Campo de velocidades no final da enchente – 524400 segundos.



Superfície livre (m)

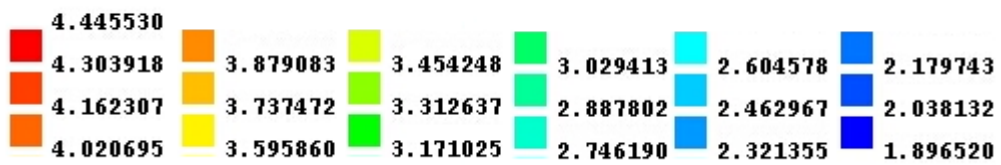


Fig.19 – Superfície livre na vazante – 536400 segundos.

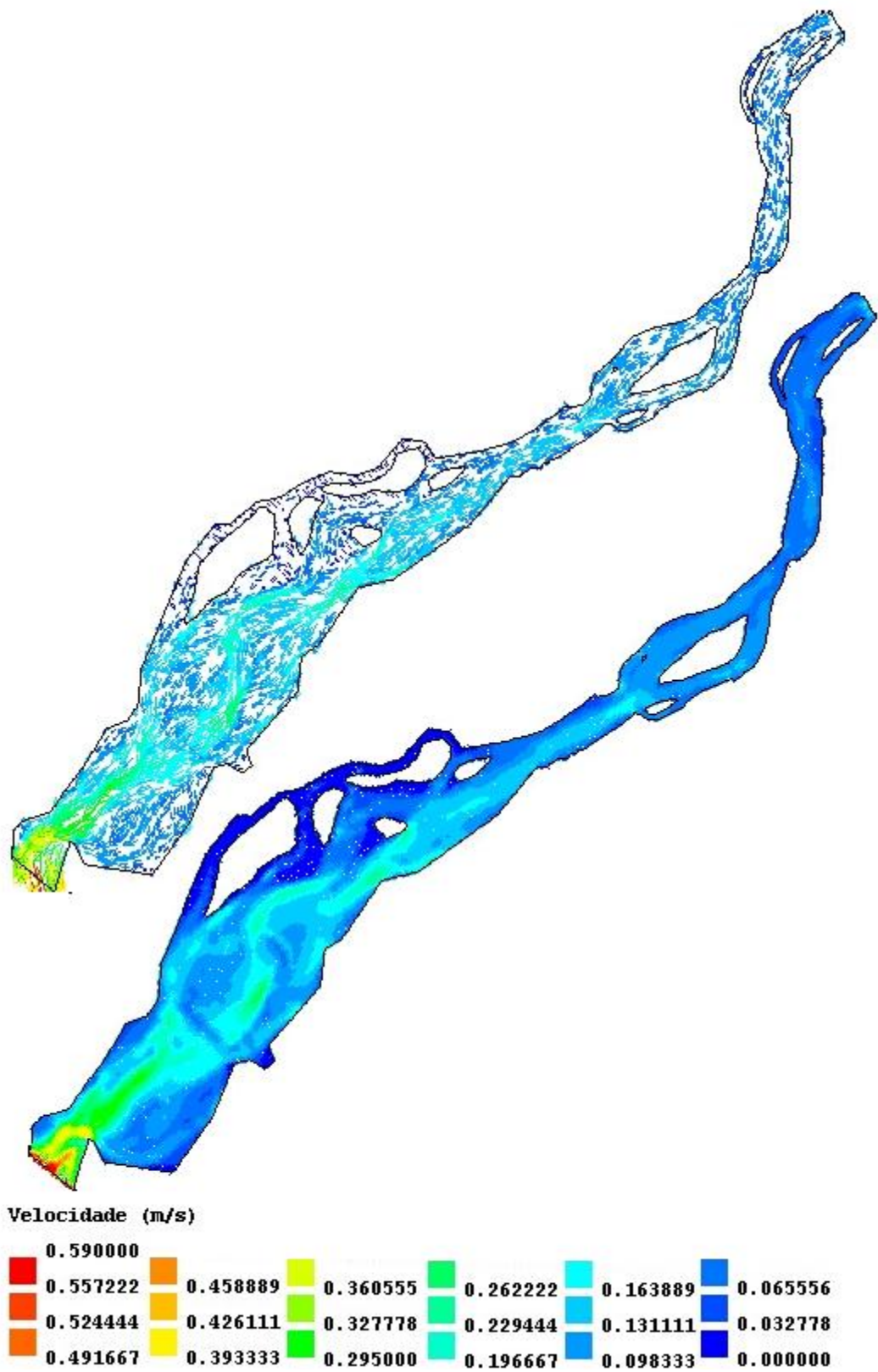
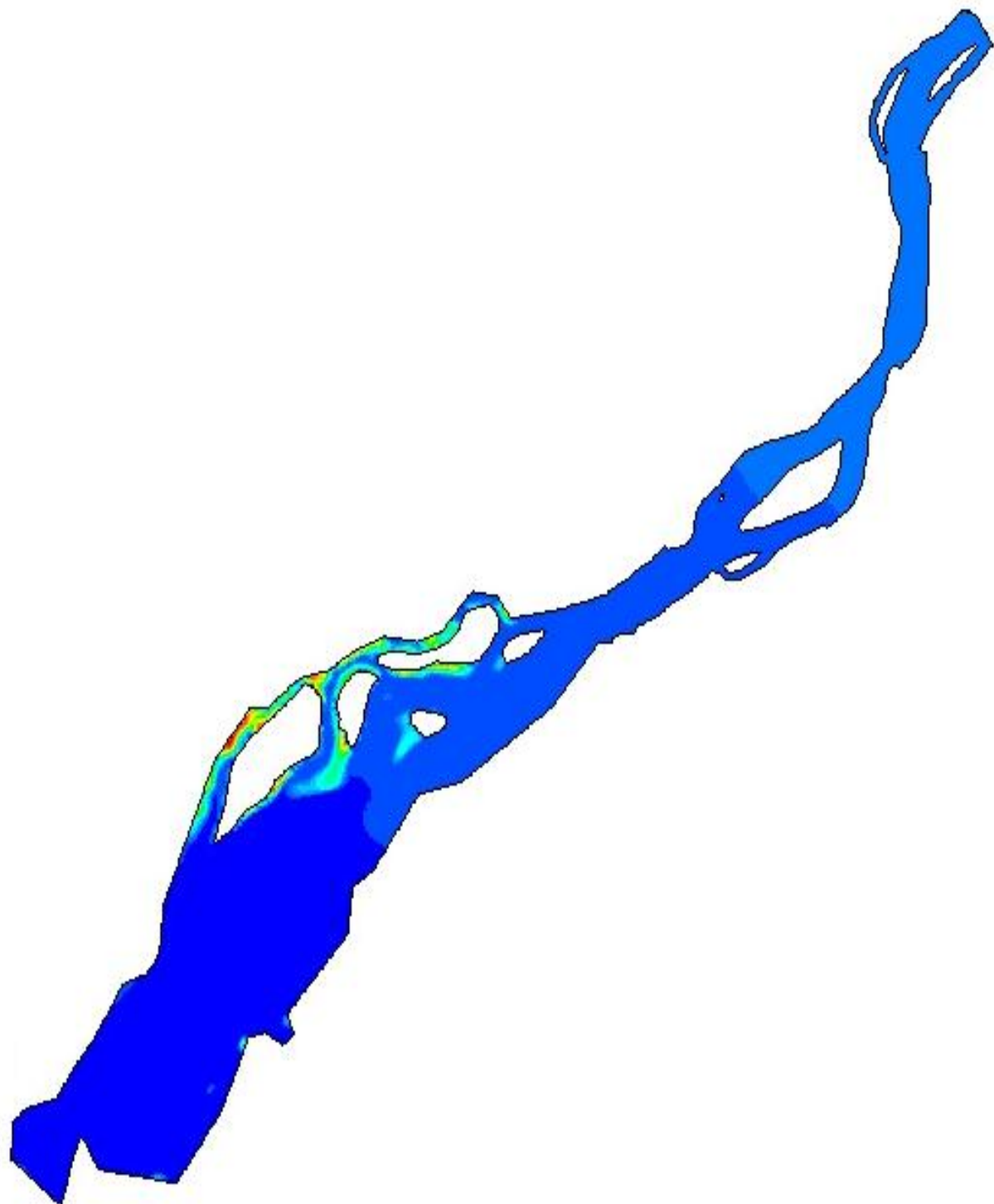


Fig.20 – Campo de velocidades em vazante – 536400 segundos.



Superfície livre (m)

4.445970					
4.295357	3.843519	3.391681	2.939842	2.488004	2.036166
4.144744	3.692906	3.241068	2.789229	2.337391	1.885553
3.994132	3.542293	3.090455	2.638617	2.186778	1.734940

Fig.21 – Superfície livre no final da vazante – 551040 segundos.

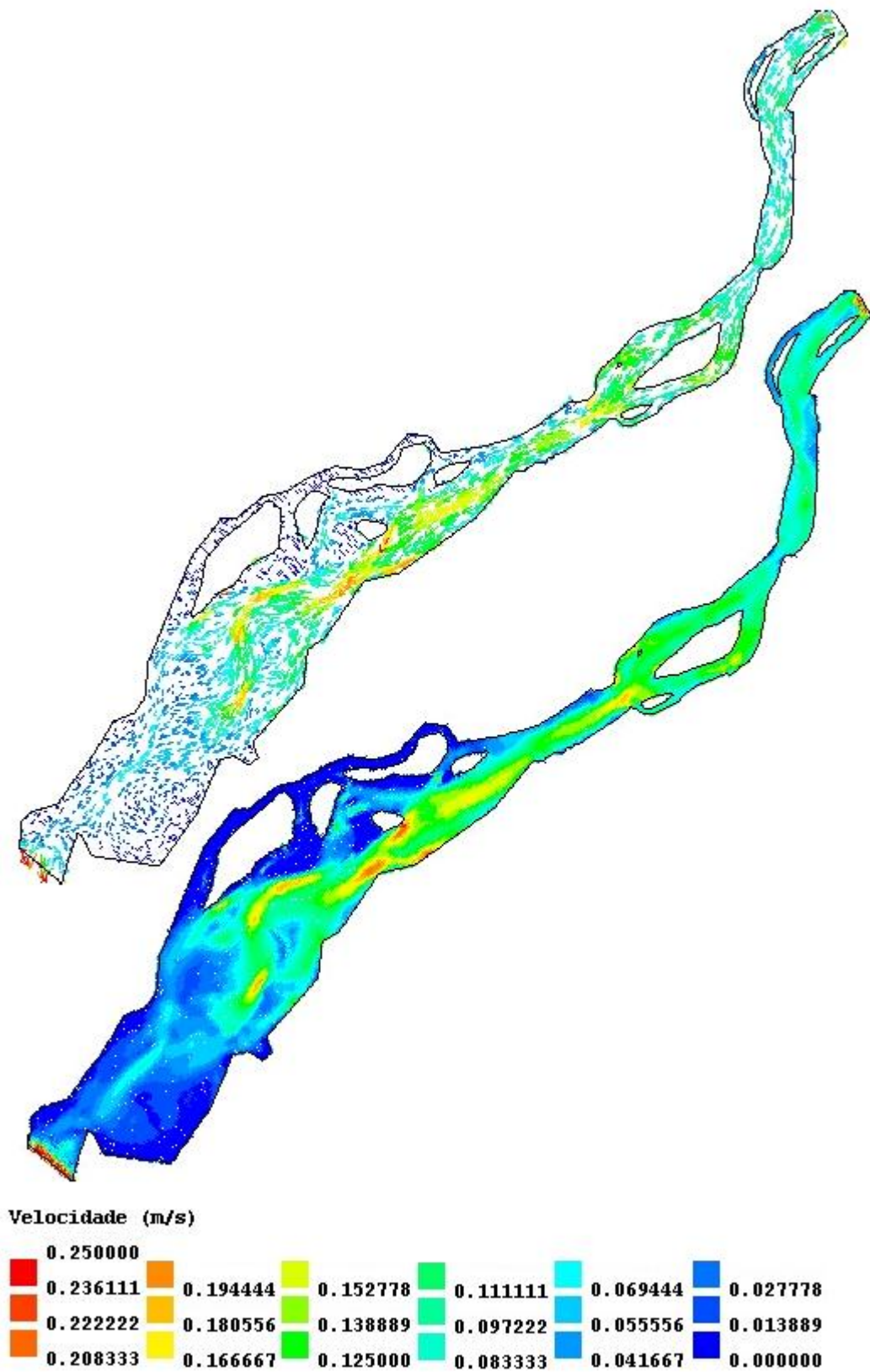


Fig.22 – Campo de velocidades no final da vazante – 551040 segundos.

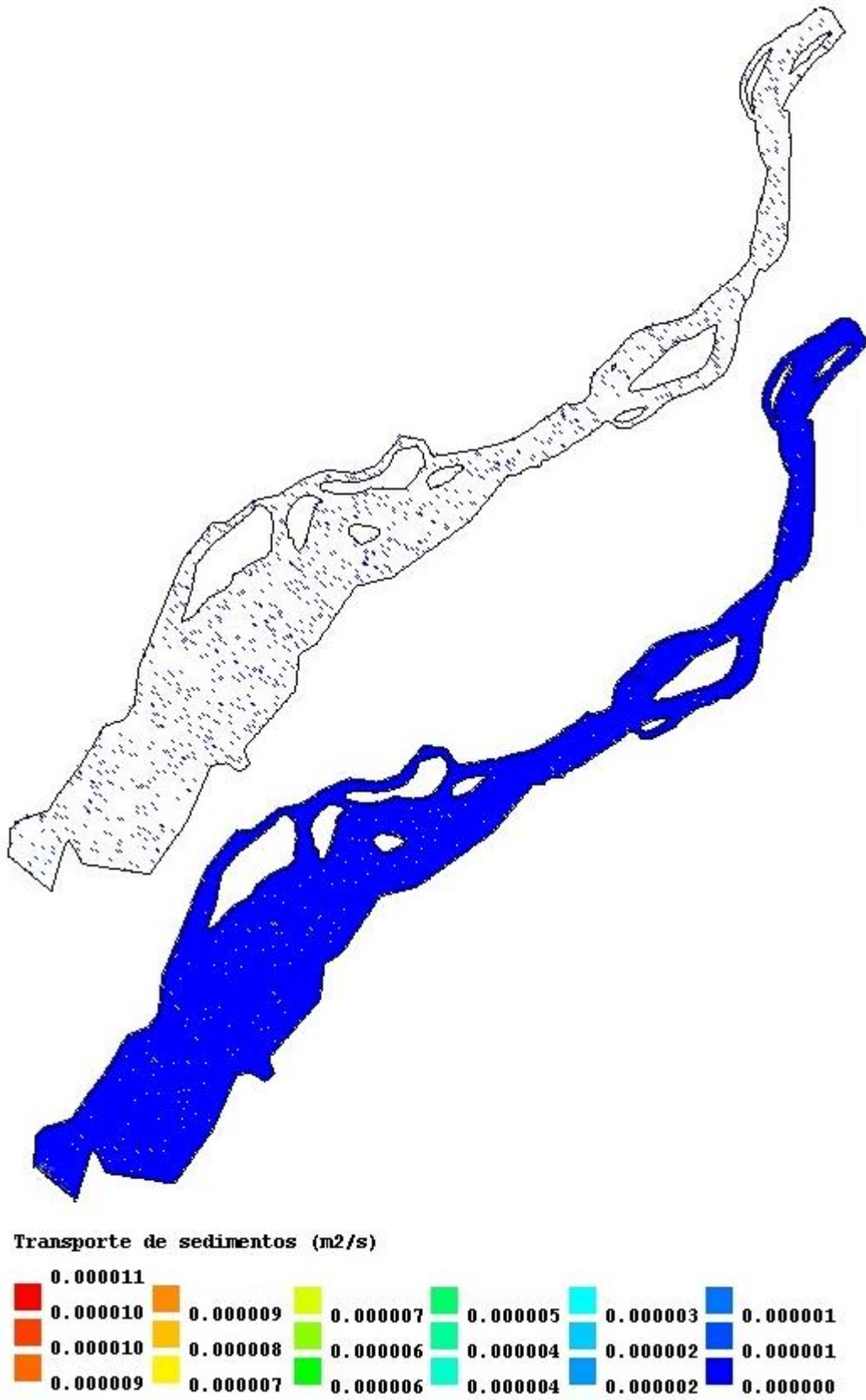


Fig.23 – Transporte de sedimentos na enchente – 516240 segundos.

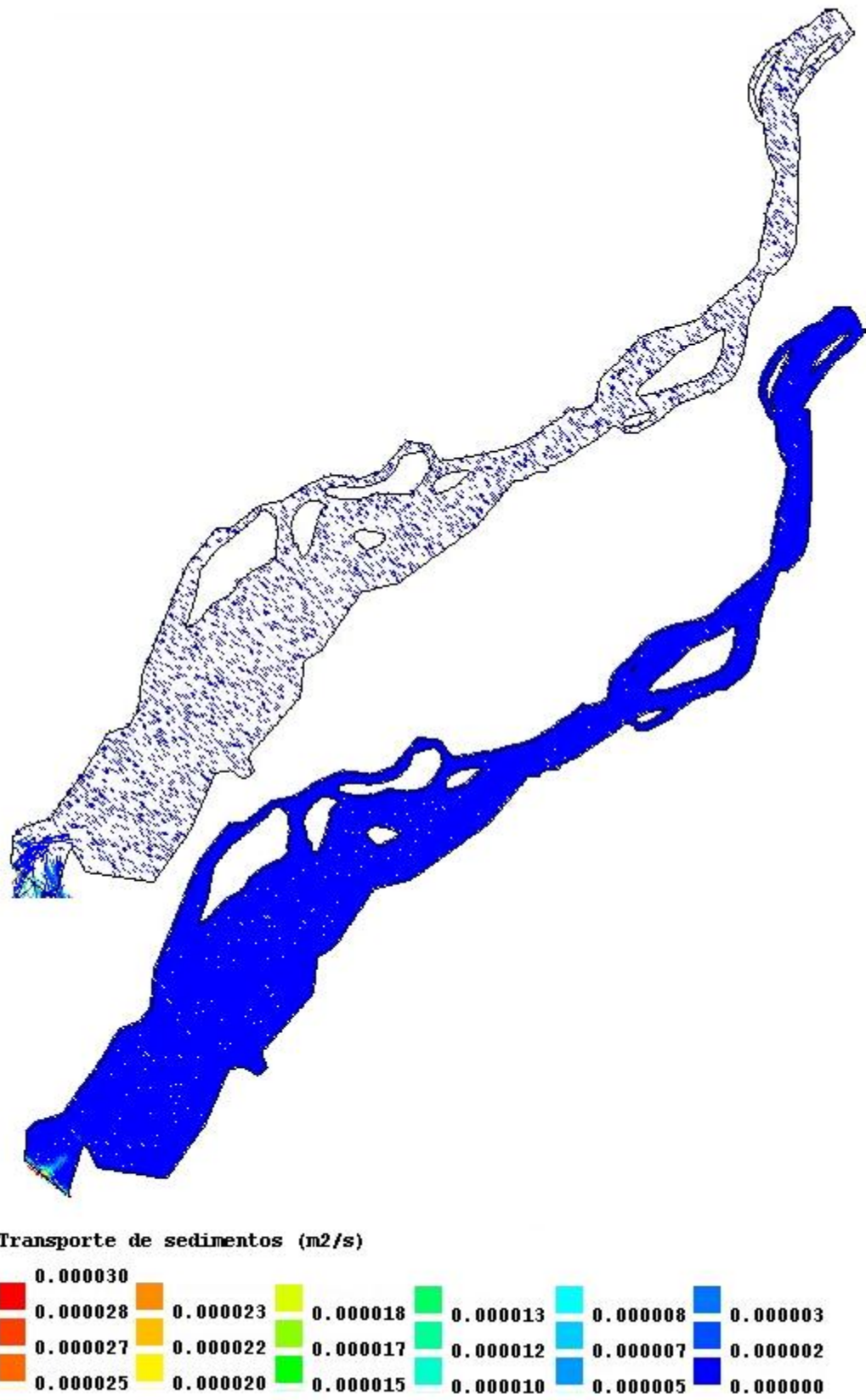


Fig.24 – Transporte de sedimentos na vazante – 535680 segundos.

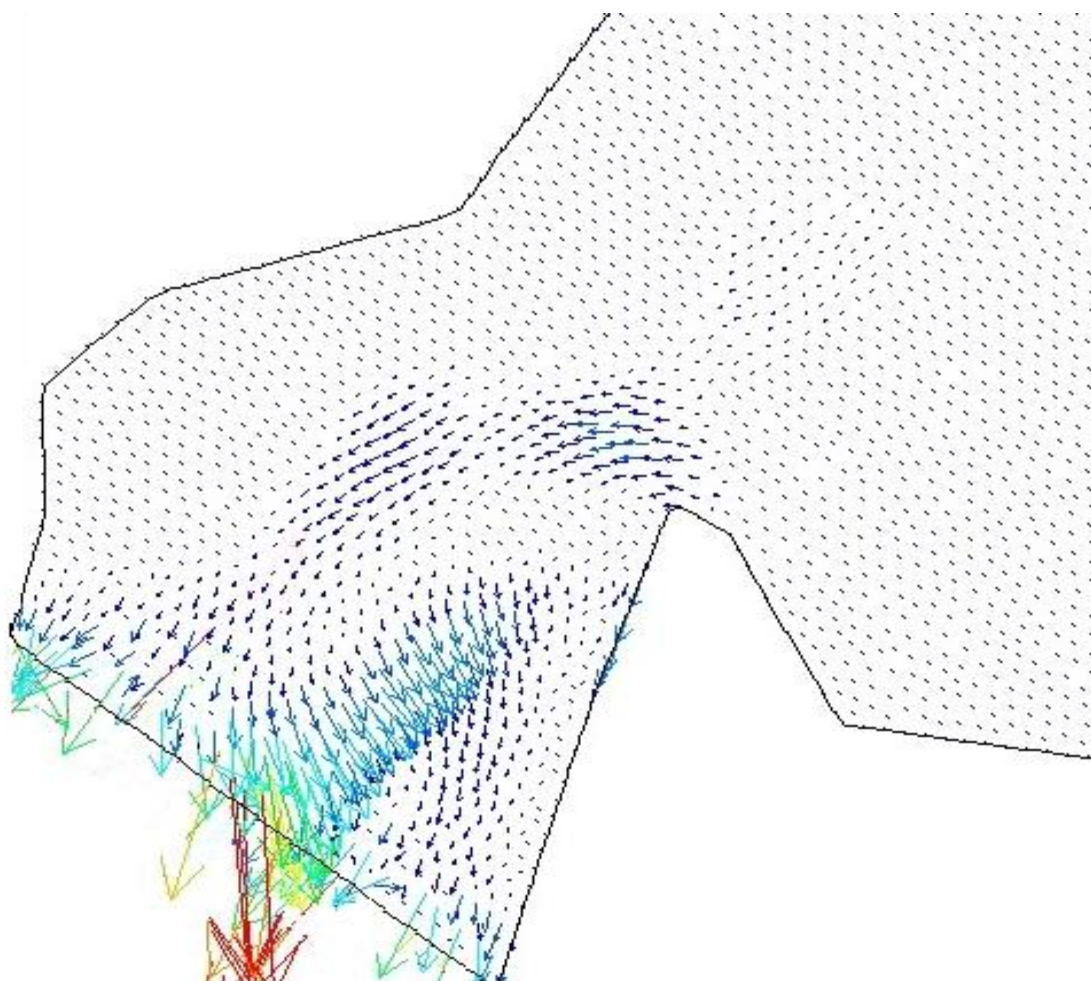


Fig.25 - Pormenor do transporte de sedimentos na embocadura durante a vazante – 535680 segundos.

CAUDAL DE INVERNO EM MARÉ VIVA – FEVEREIRO DE 2006

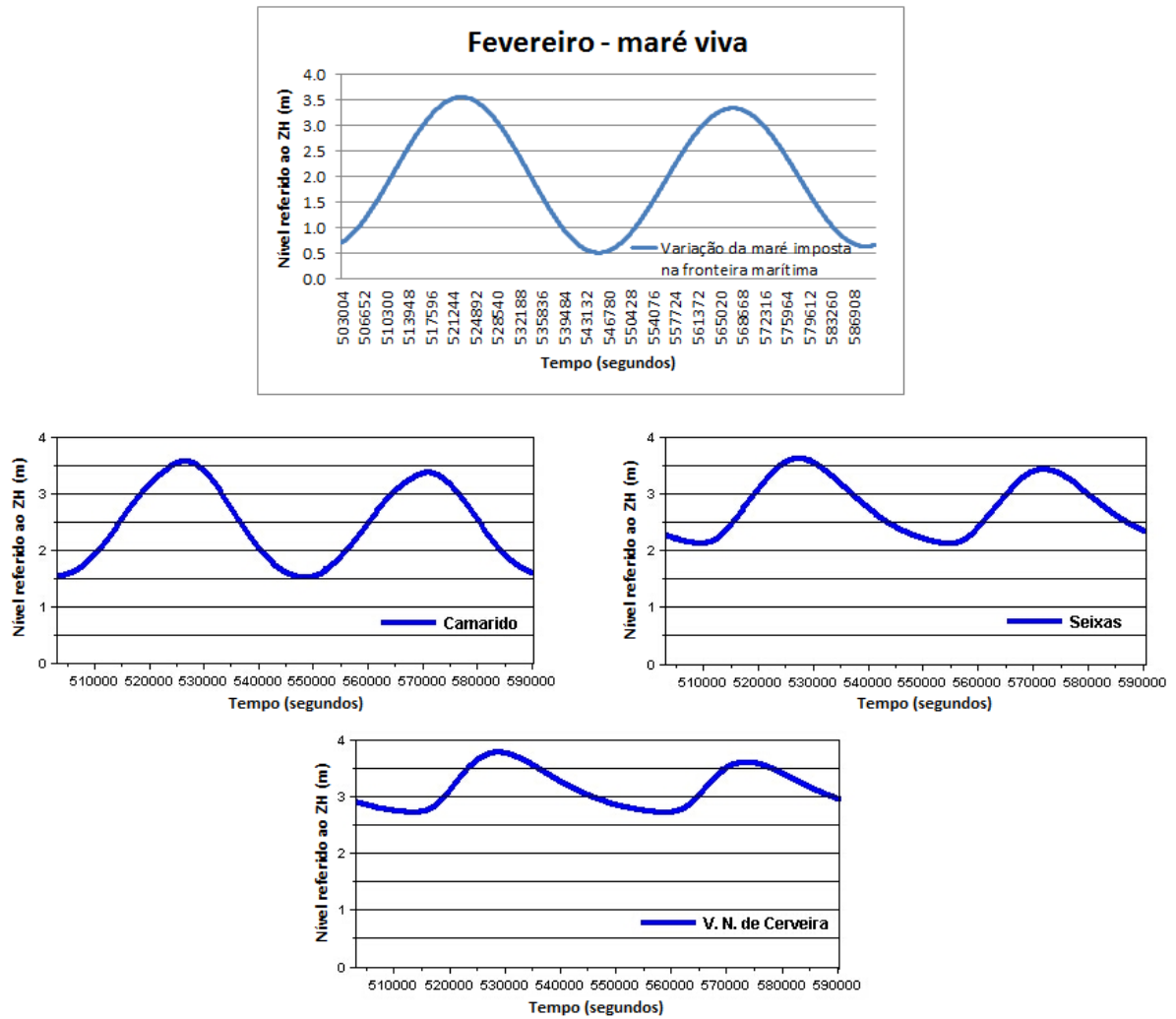


Fig.26 – Propagação da maré viva em Fevereiro de 2006: a) imposta na fronteira marítima; b) Camarido; c) Seixas; d) V. N. de Cerveira.

Tabela 3 – Instantes em que foram apresentados resultados para a superfície livre, campo de velocidades e transporte de sedimentos.

<b>Caudal = 582,77m³/s</b>	Instante (segundos)
<b>Superfície livre/Campos de velocidades</b>	
enchente	516000
fim da enchente	525800
vazante	544080
fim da vazante	554880
<b>Transporte de sedimentos</b>	
enchente	517680
vazante	543600

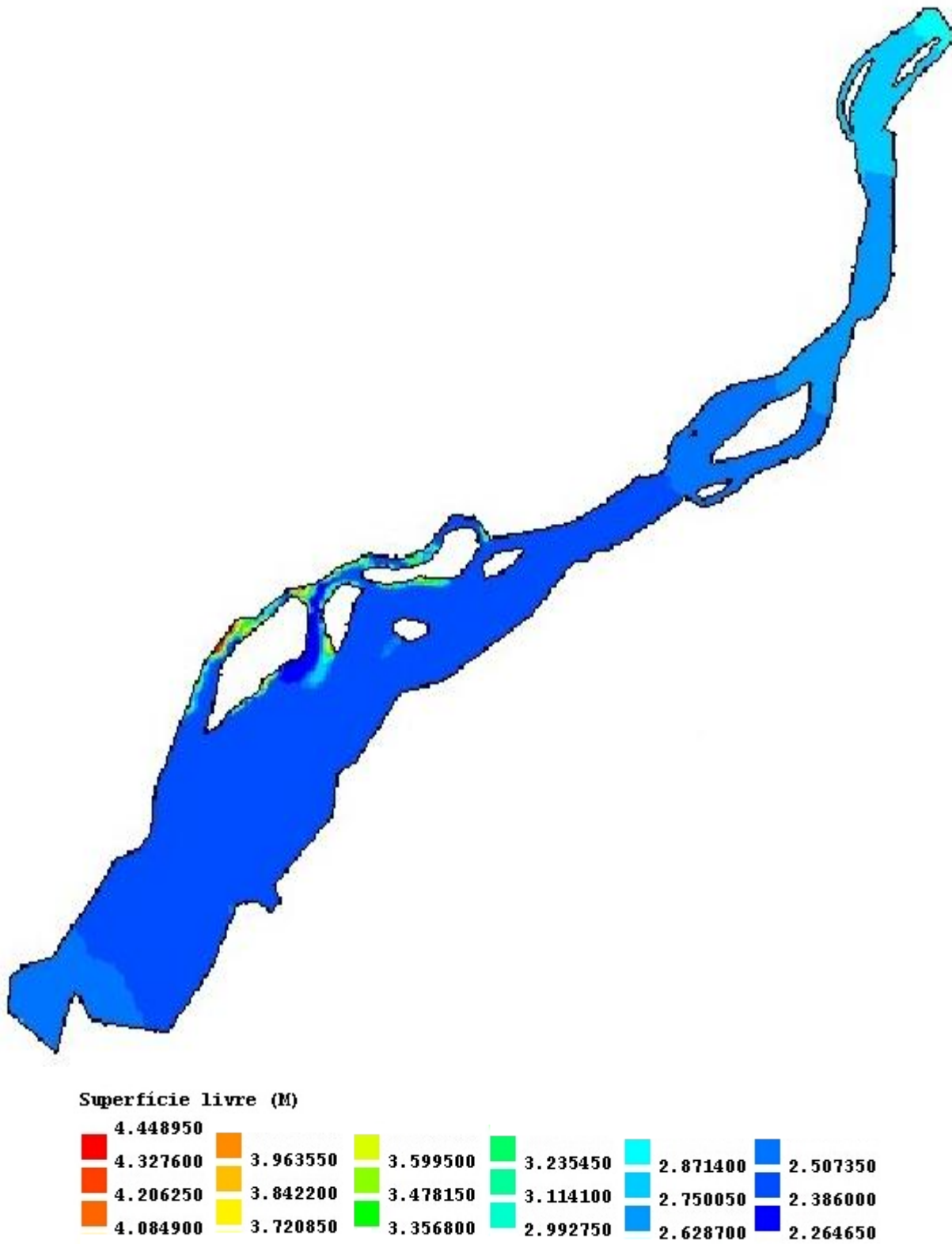


Fig.27 – Superfície livre na enchente – 516000 segundos

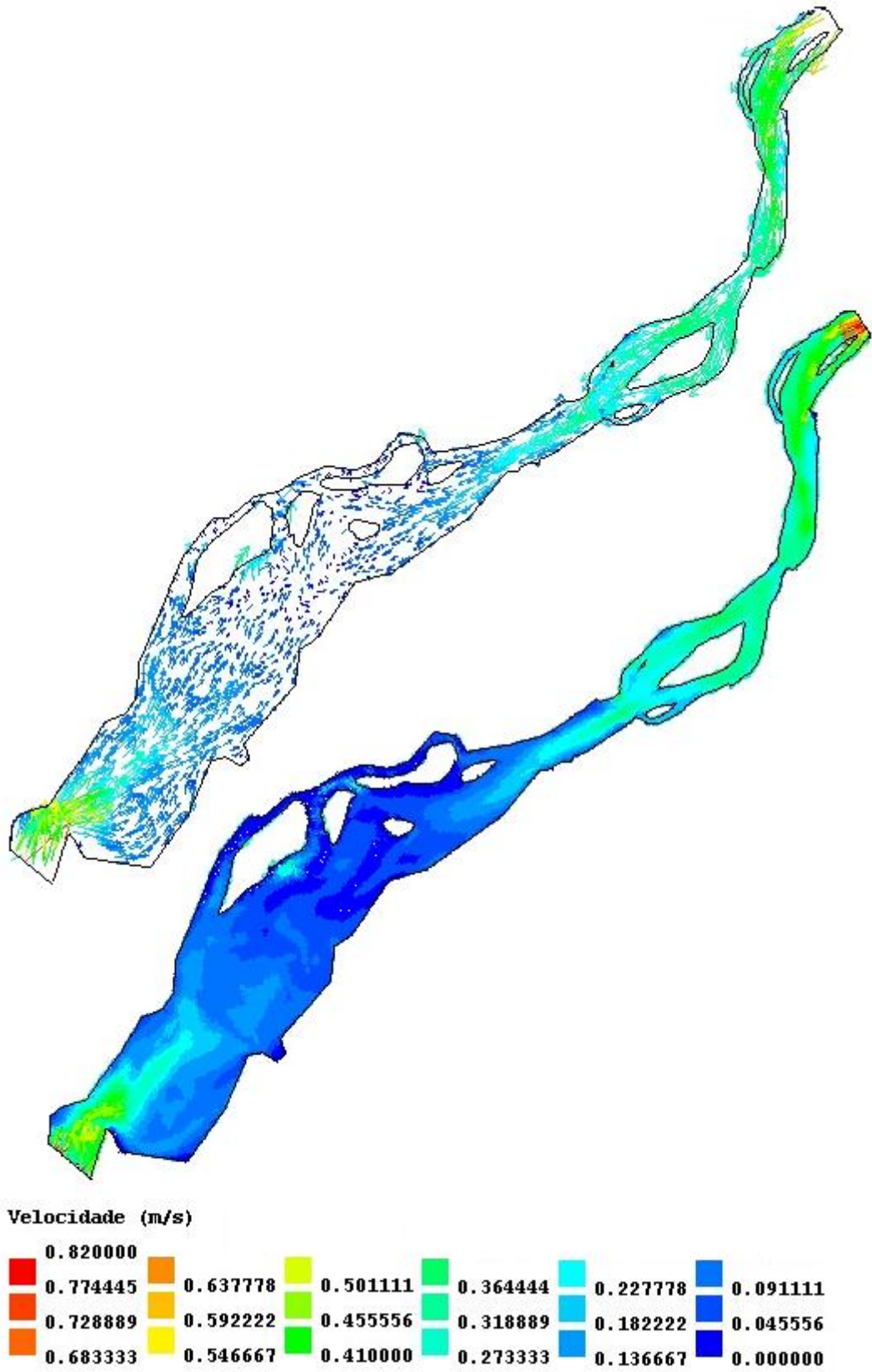


Fig.28 – Campos de velocidades na enchente – 516000 segundos.

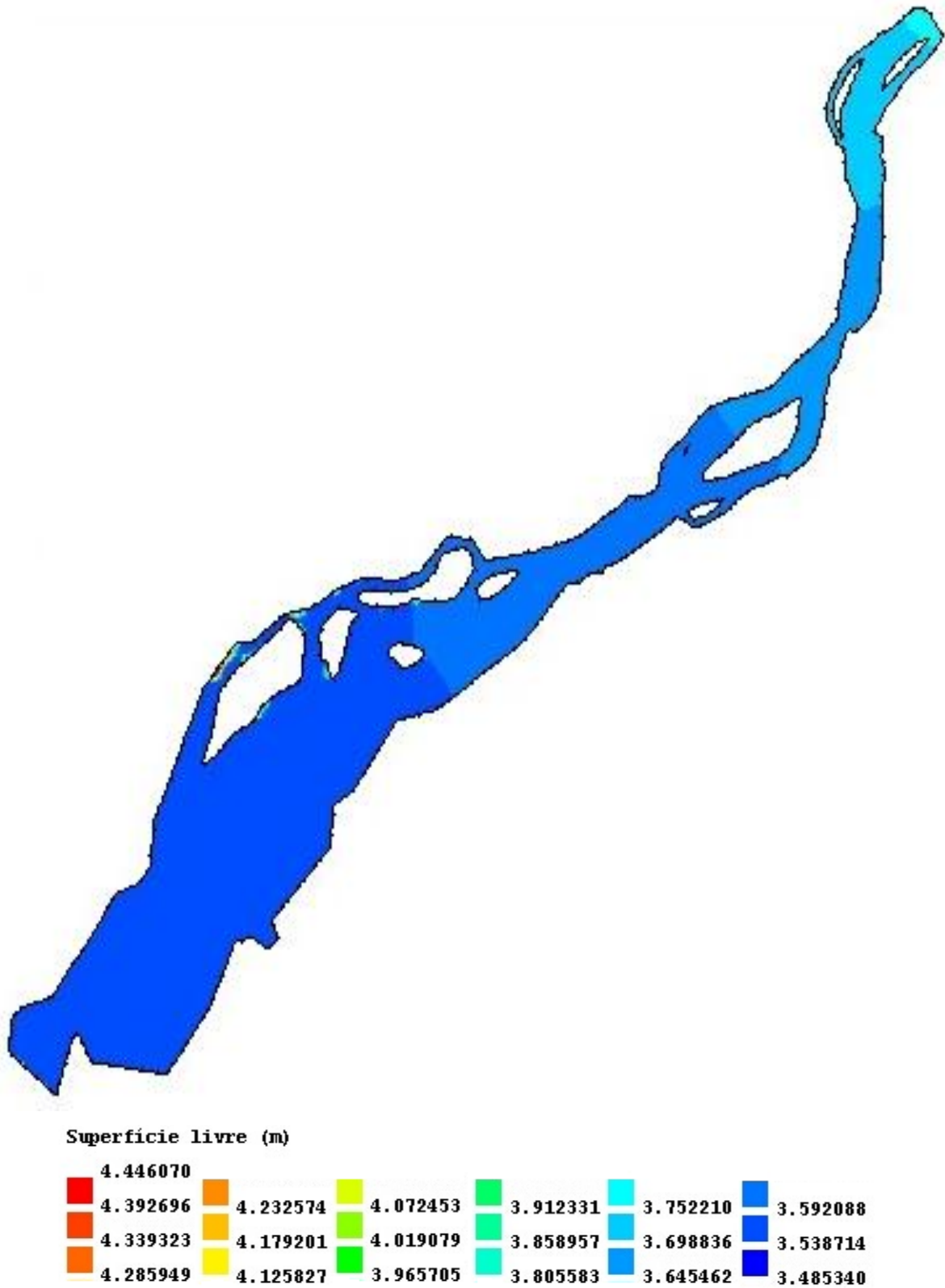


Fig.29 – Superfície livre no final da enchente – 525800 segundos.

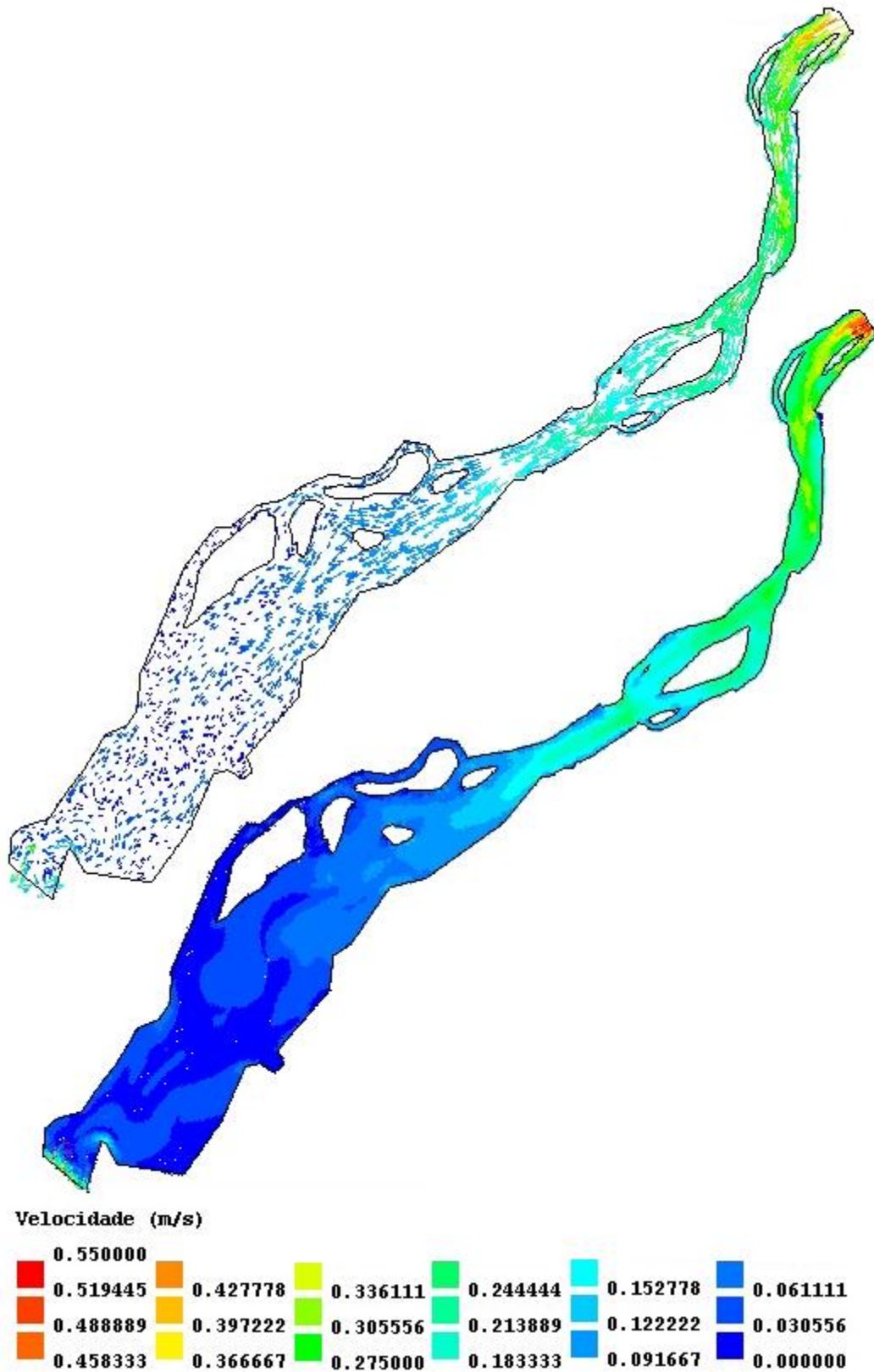
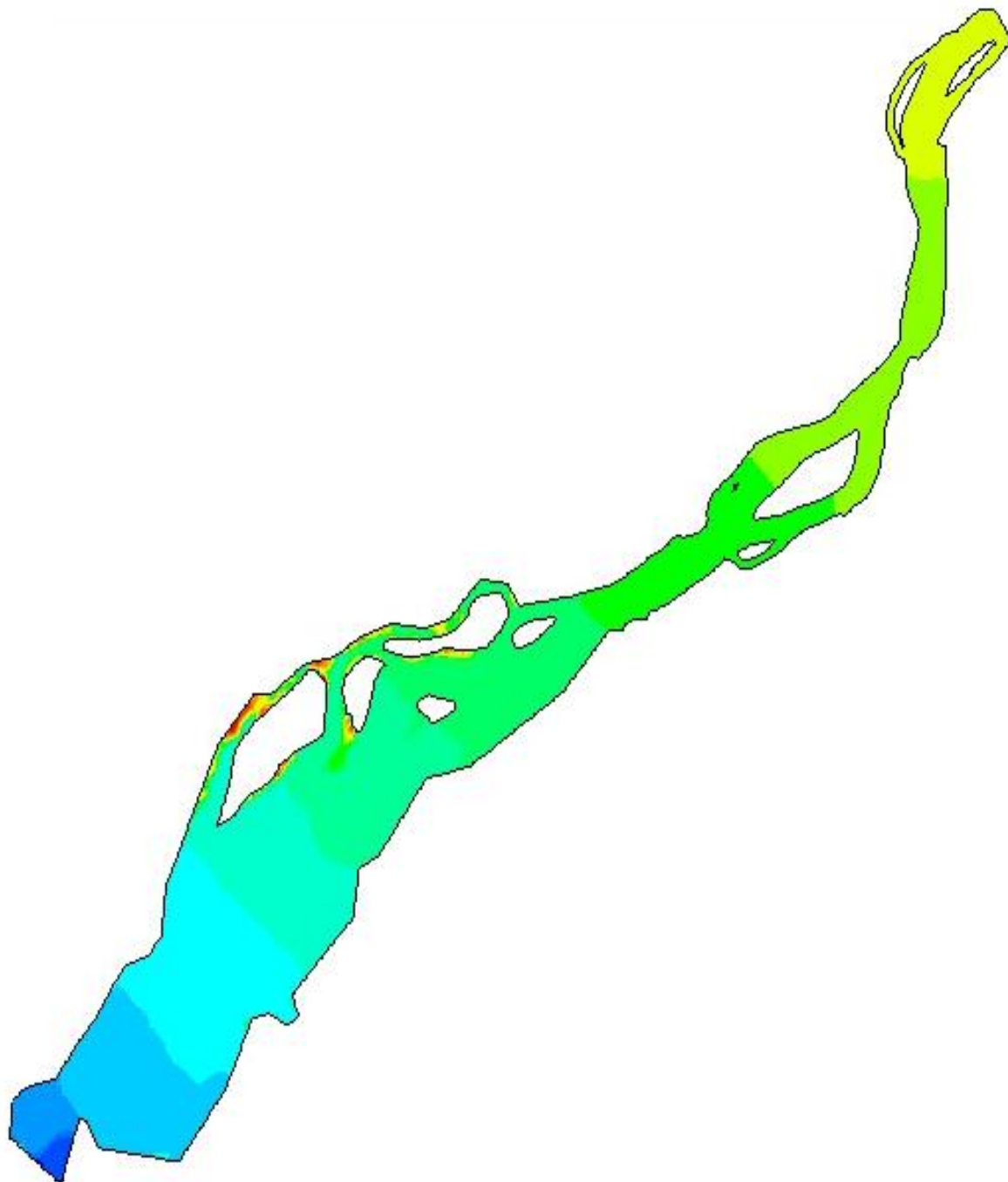


Fig.30 – Campo de velocidades no final da enchente – 525800 segundos.



Superfície livre (m)

4.445100					
4.251541	3.670866	3.090190	2.509514	1.928839	1.348163
4.057983	3.477307	2.896631	2.315956	1.735280	1.154605
3.864424	3.283749	2.703073	2.122397	1.541722	0.961046

Fig.31 – Superfície livre na vazante – 544080 segundos.

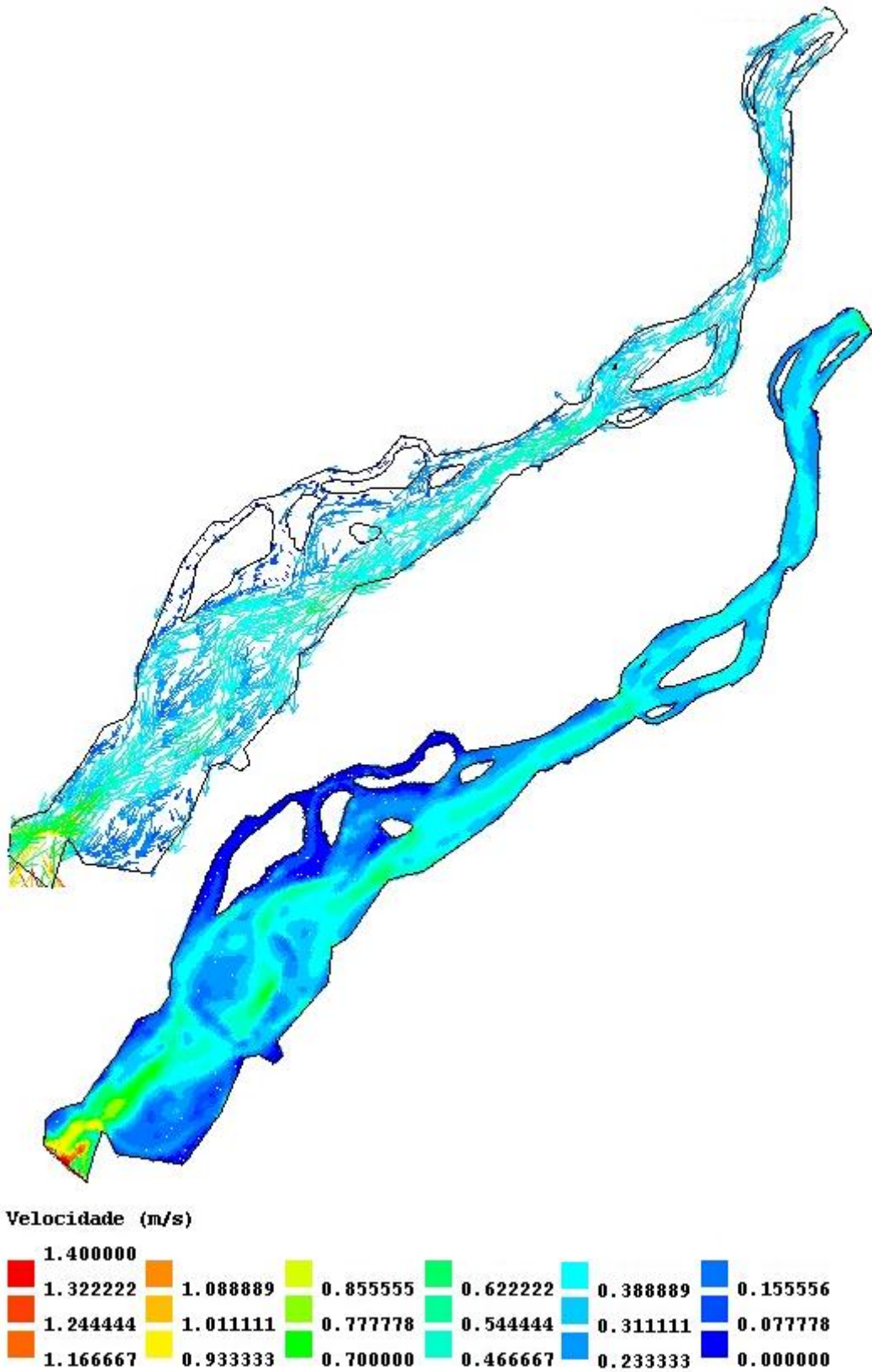
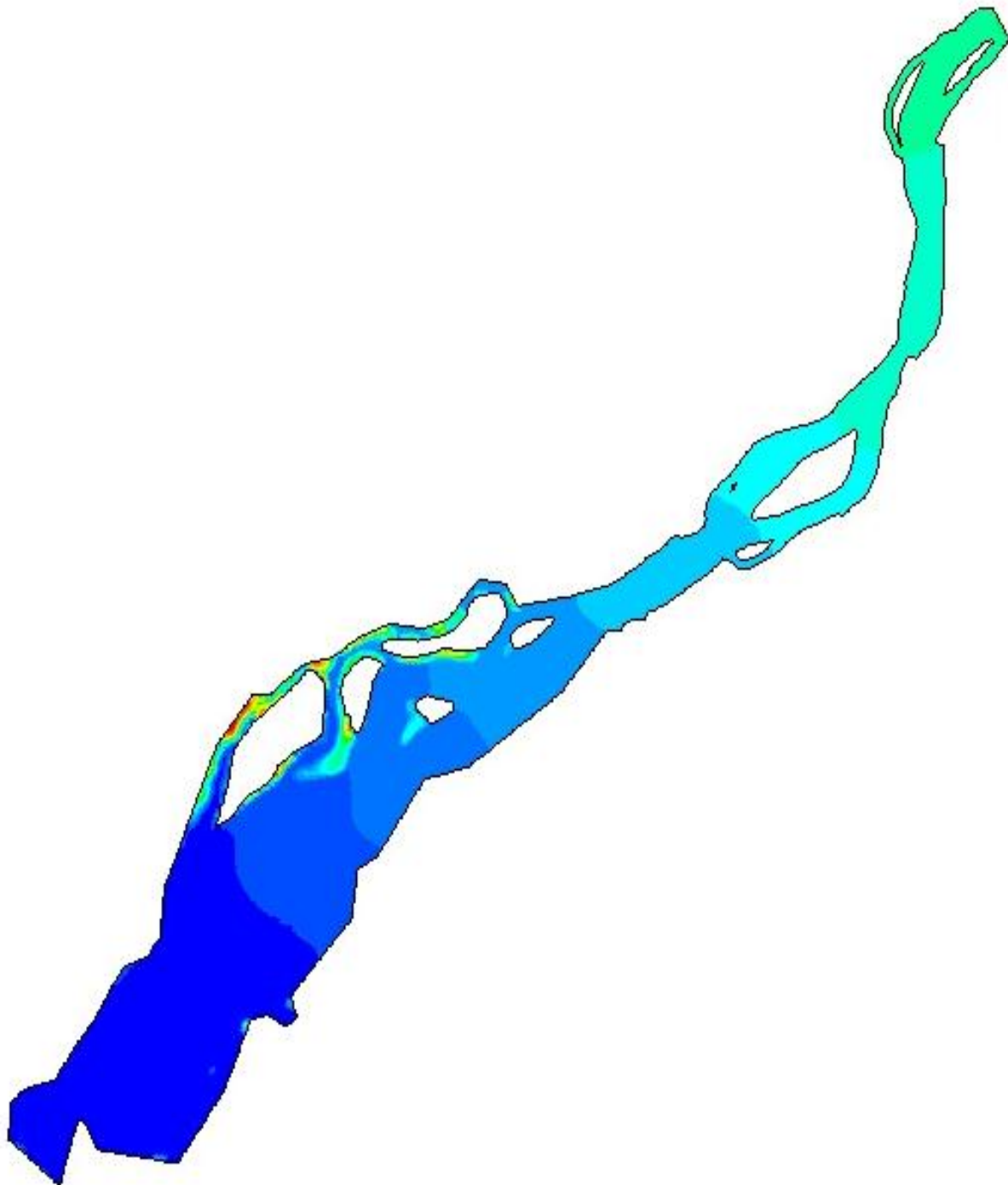


Fig.32 – Campo de velocidades na vazante – 544080 segundos.



**Superfície livre (m)**

4.446430					
4.296542	3.846877	3.397212	2.947547	2.497882	2.048217
4.146654	3.696989	3.247324	2.797658	2.347993	1.898328
3.996765	3.547100	3.097435	2.647770	2.198105	1.748440

Fig.33 – Superfície livre no final da vazante – 554880 segundos.

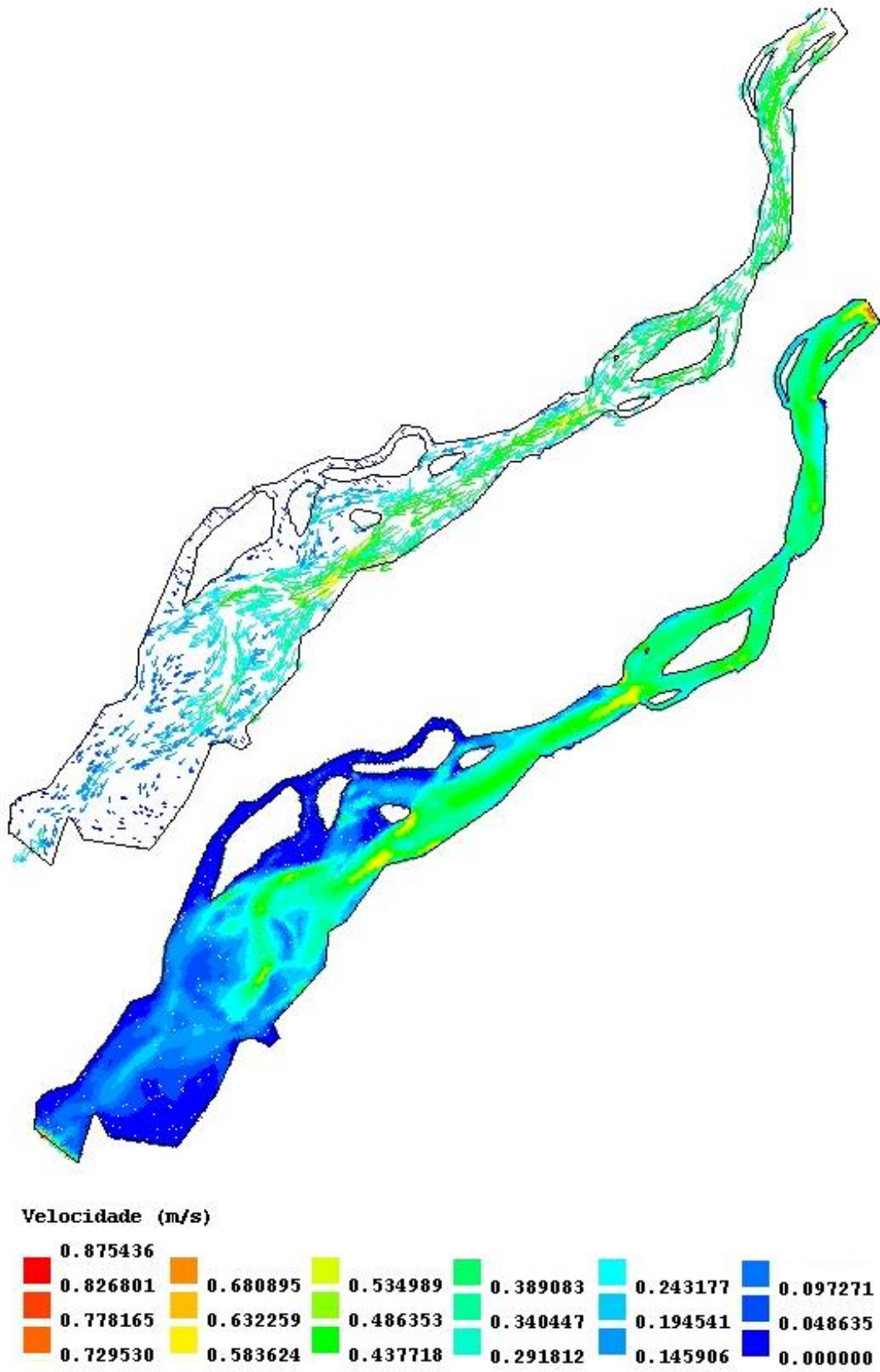
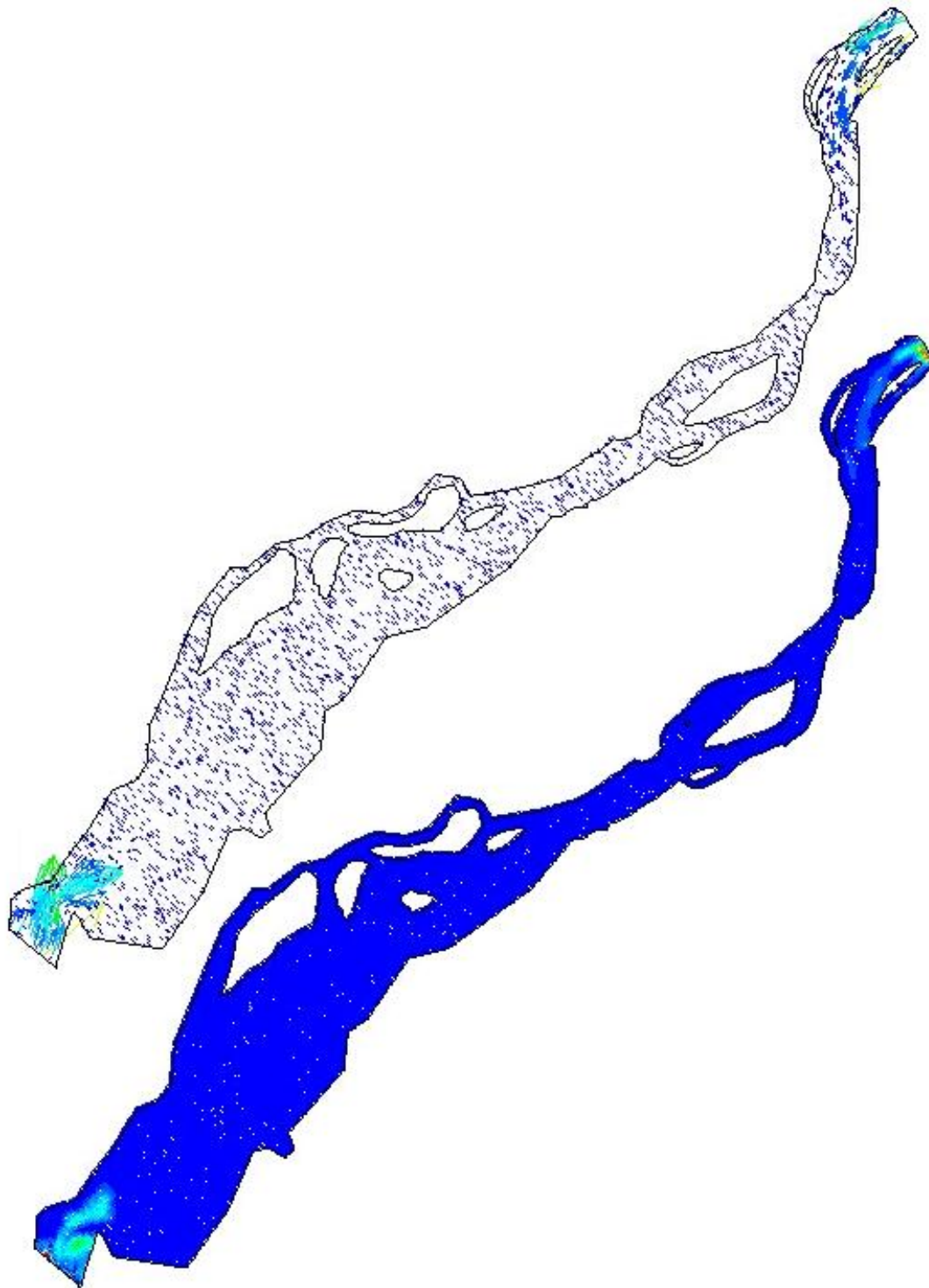


Fig.34 – Campo de velocidades no final da vazante – 554880 segundos.



Transporte de sedimentos (m2/s)

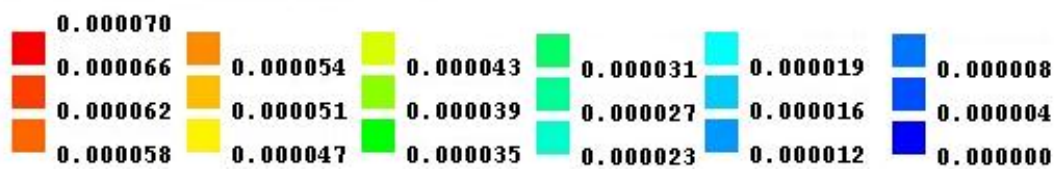


Fig.35 – Transporte de sedimentos na enchente – 517680 segundos.

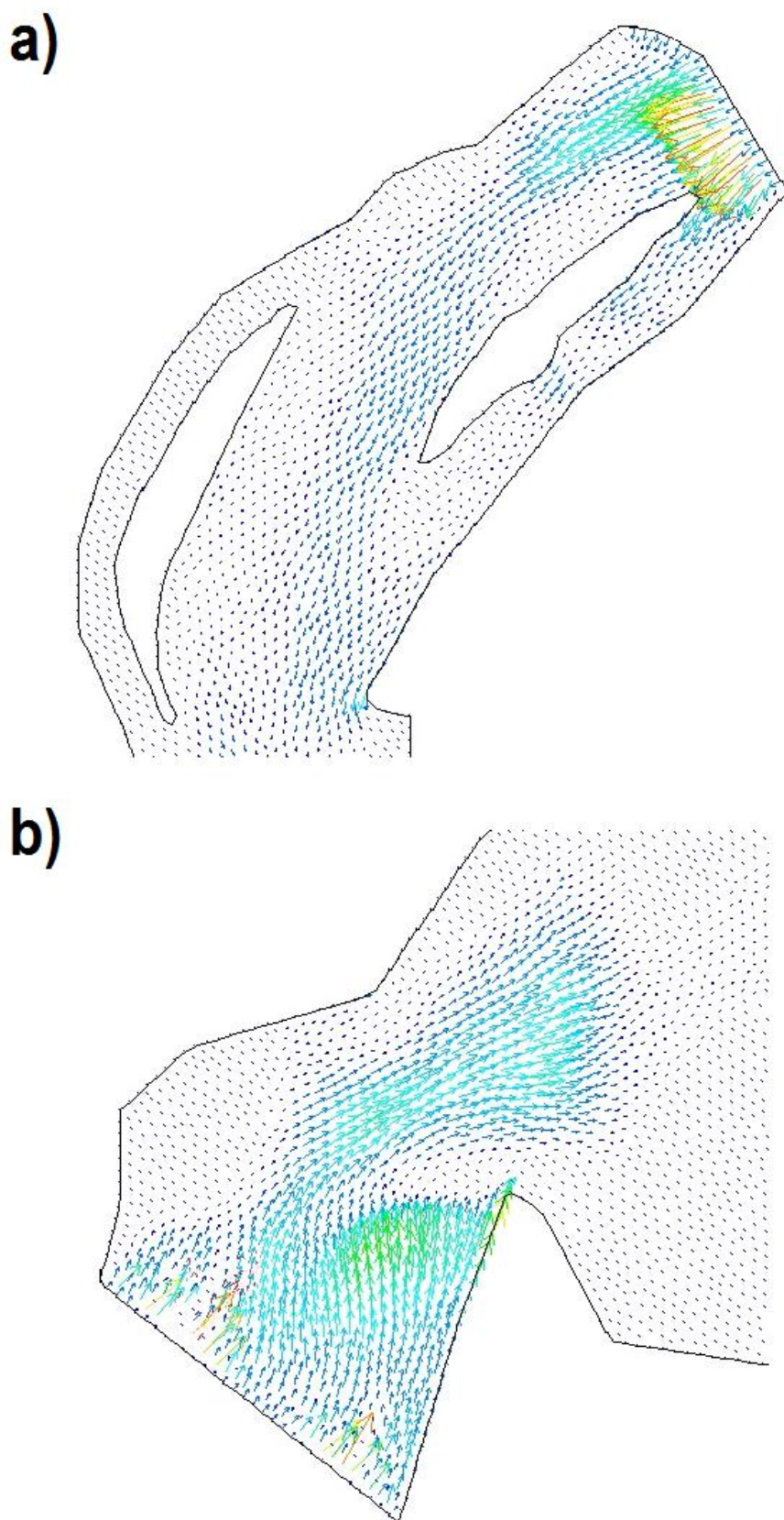
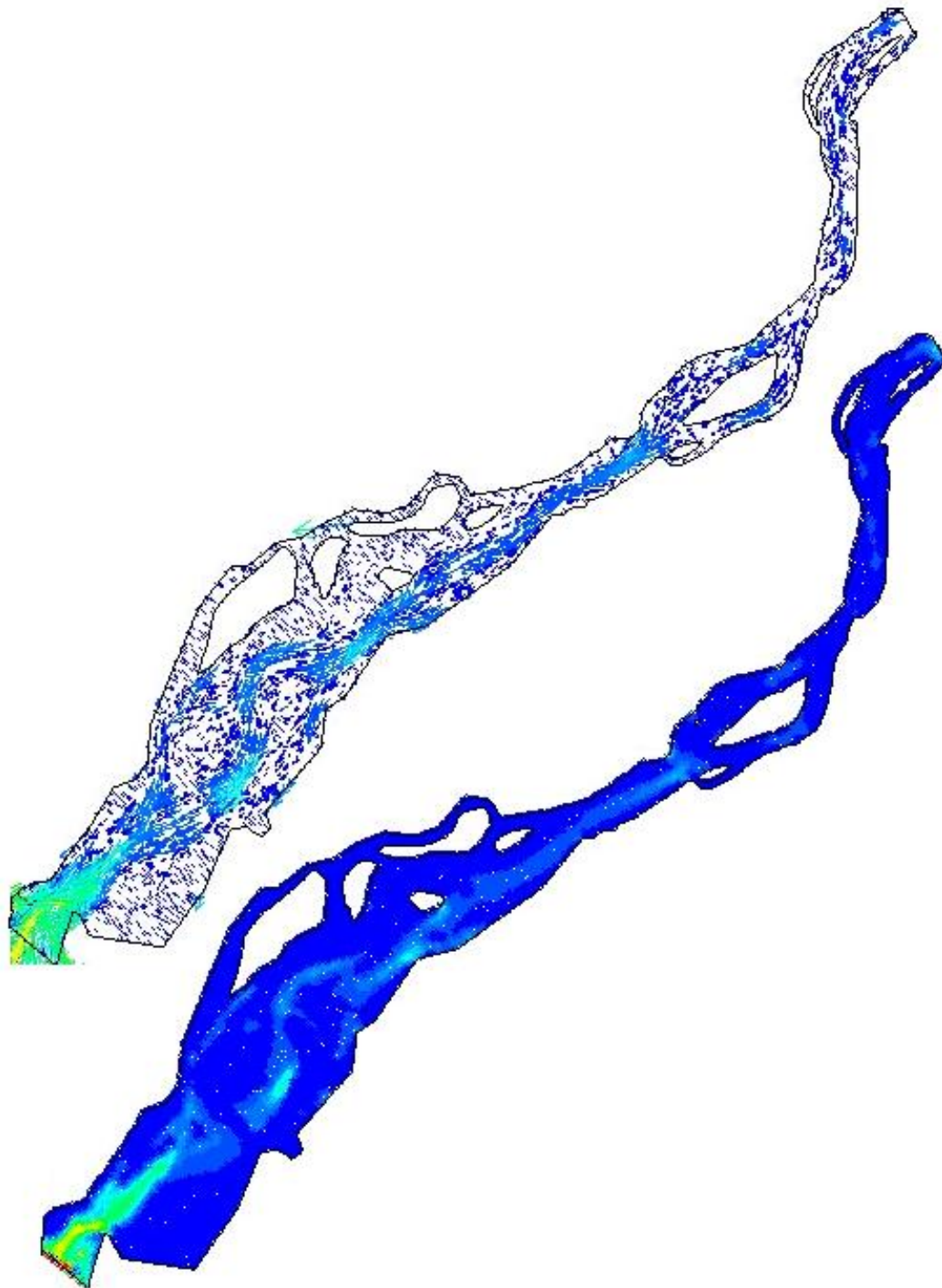


Fig.36 - Pormenor do transporte de sedimentos durante a enchente na: a) entrada; b) embocadura, do estuário – 517680 segundos.



Transporte de sedimentos (m<sup>2</sup>/s)

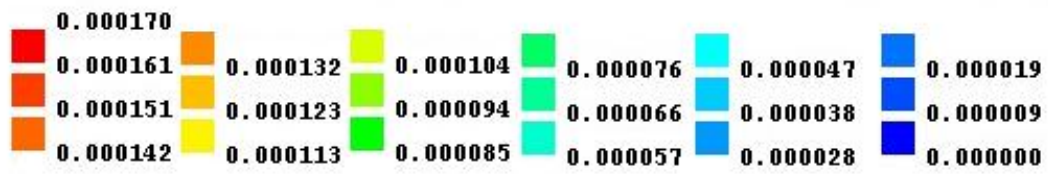


Fig.37 – Transporte de sedimentos na vazante – 543600 segundos.

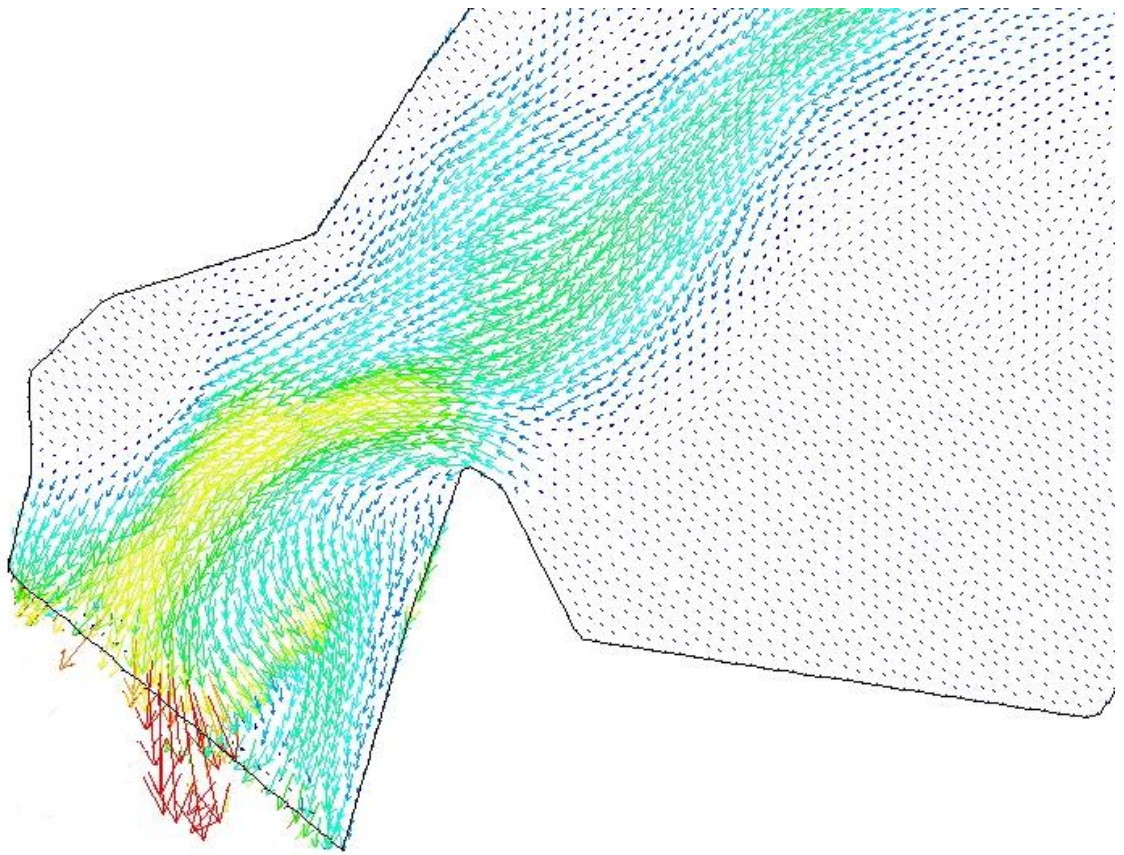


Fig.38 – Pormenor do transporte de sedimentos na embocadura durante a vazante – 543600 segundos.

CAUDAL DE INVERNO EM MARÉ MORTA – FEVEREIRO DE 2006

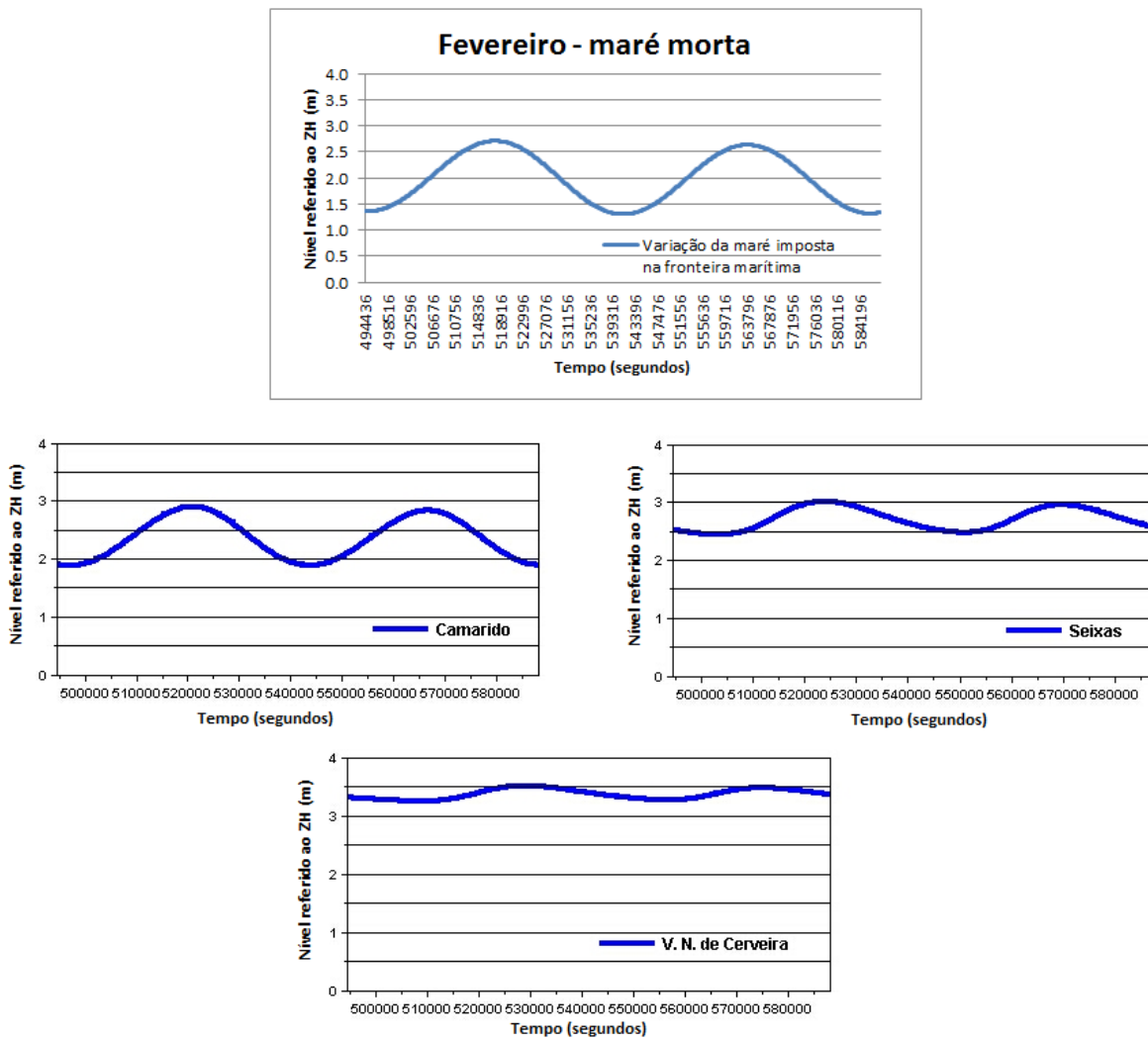


Fig.39 – Propagação da maré morta em Fevereiro de 2006: a) imposta na fronteira marítima; b) Camarido; c) Seixas; d) V. N. de Cerveira.

Tabela 4 – Instantes em que foram apresentados resultados para a superfície livre, campo de velocidades e transporte de sedimentos.

<b>Caudal = 582,77m³/s</b>	Instante (segundos)
<b>Superfície livre/Campos de velocidades</b>	
enchente	511000
fim da enchente	521760
vazante	537120
fim da vazante	553920
<b>Transporte de sedimentos</b>	
enchente	511920
vazante	536640

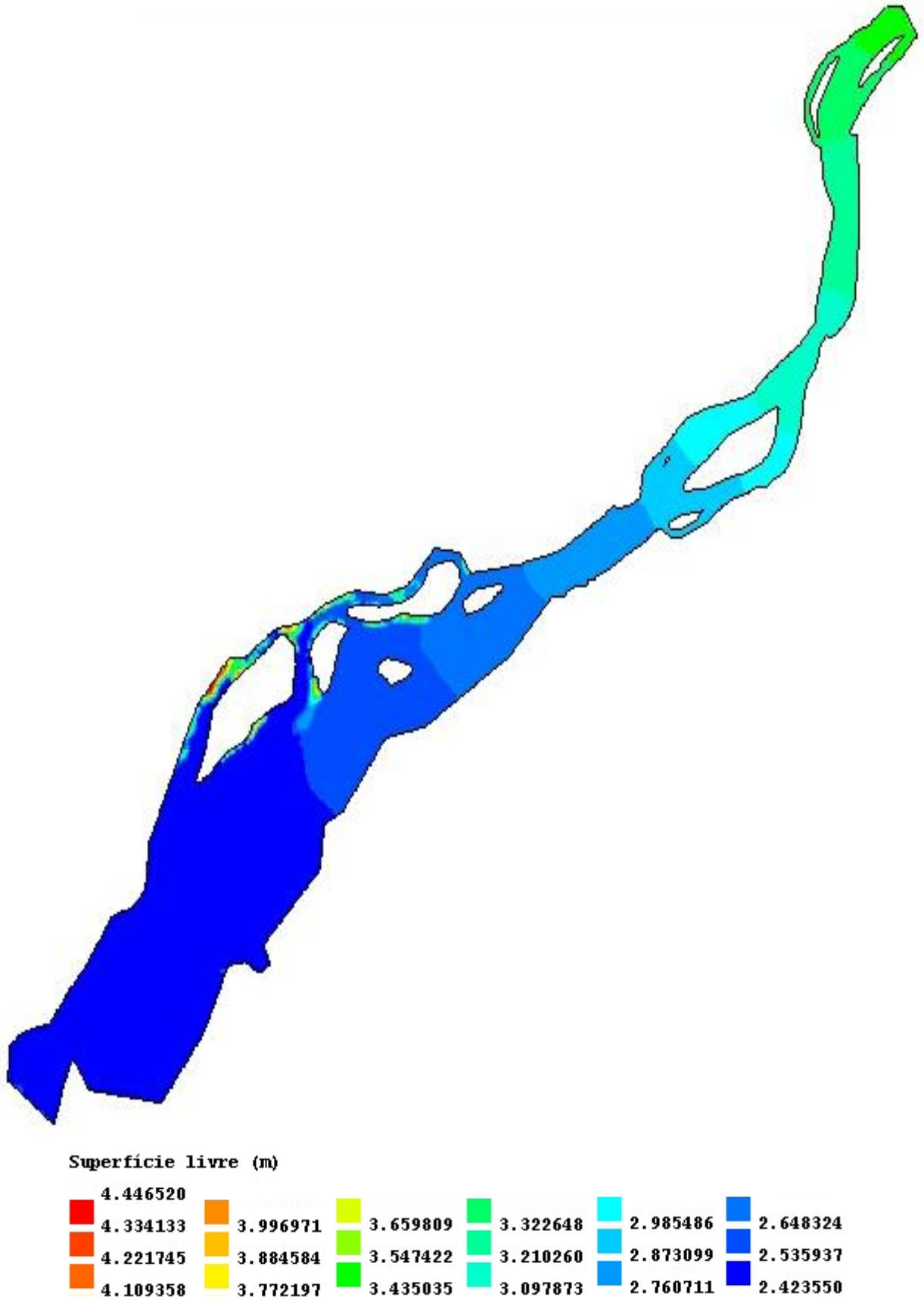


Fig.40 – Superfície livre na enchente – 511000 segundos.

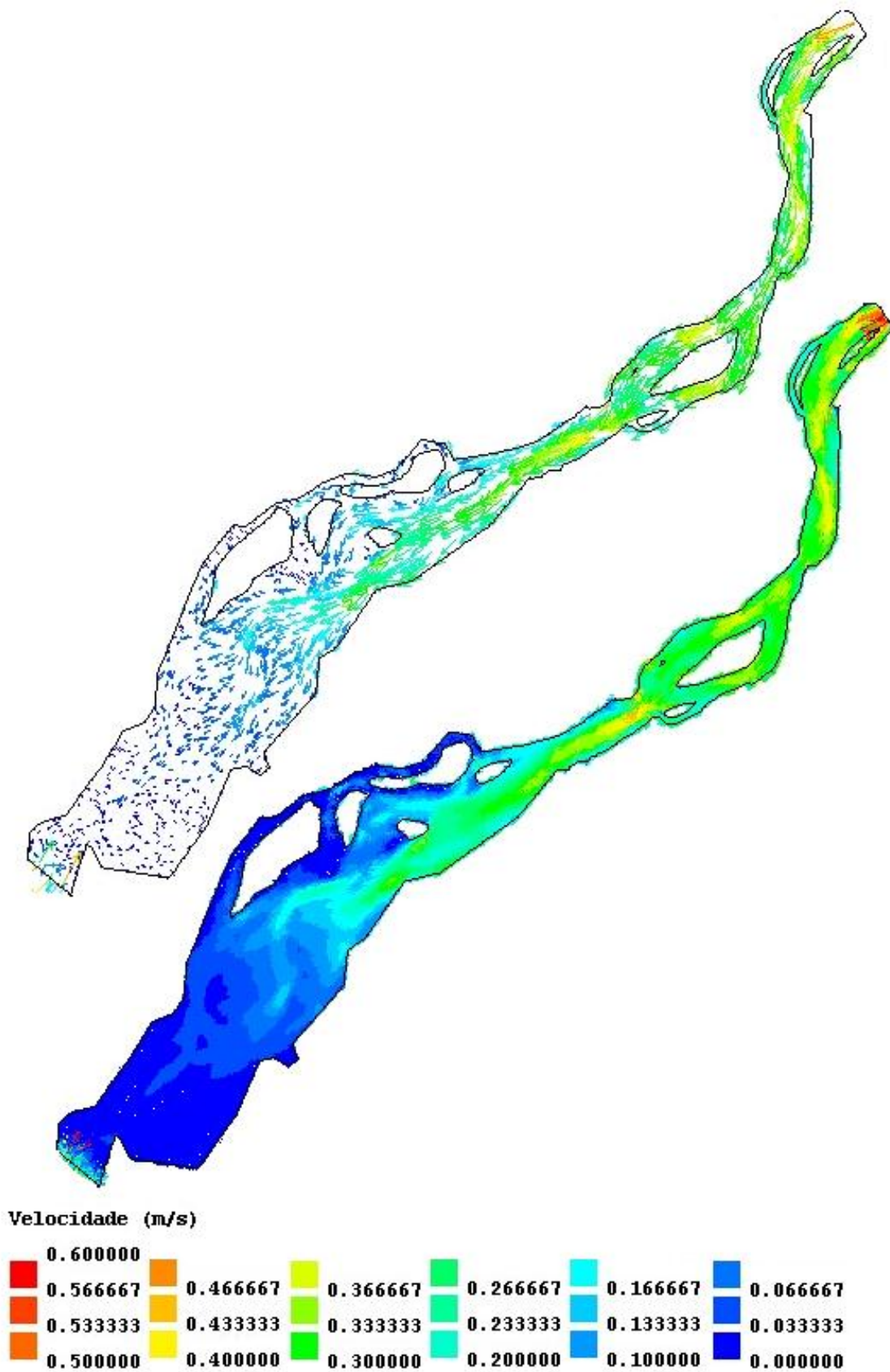


Fig.41 – Campo de velocidades na enchente – 51100 segundos.

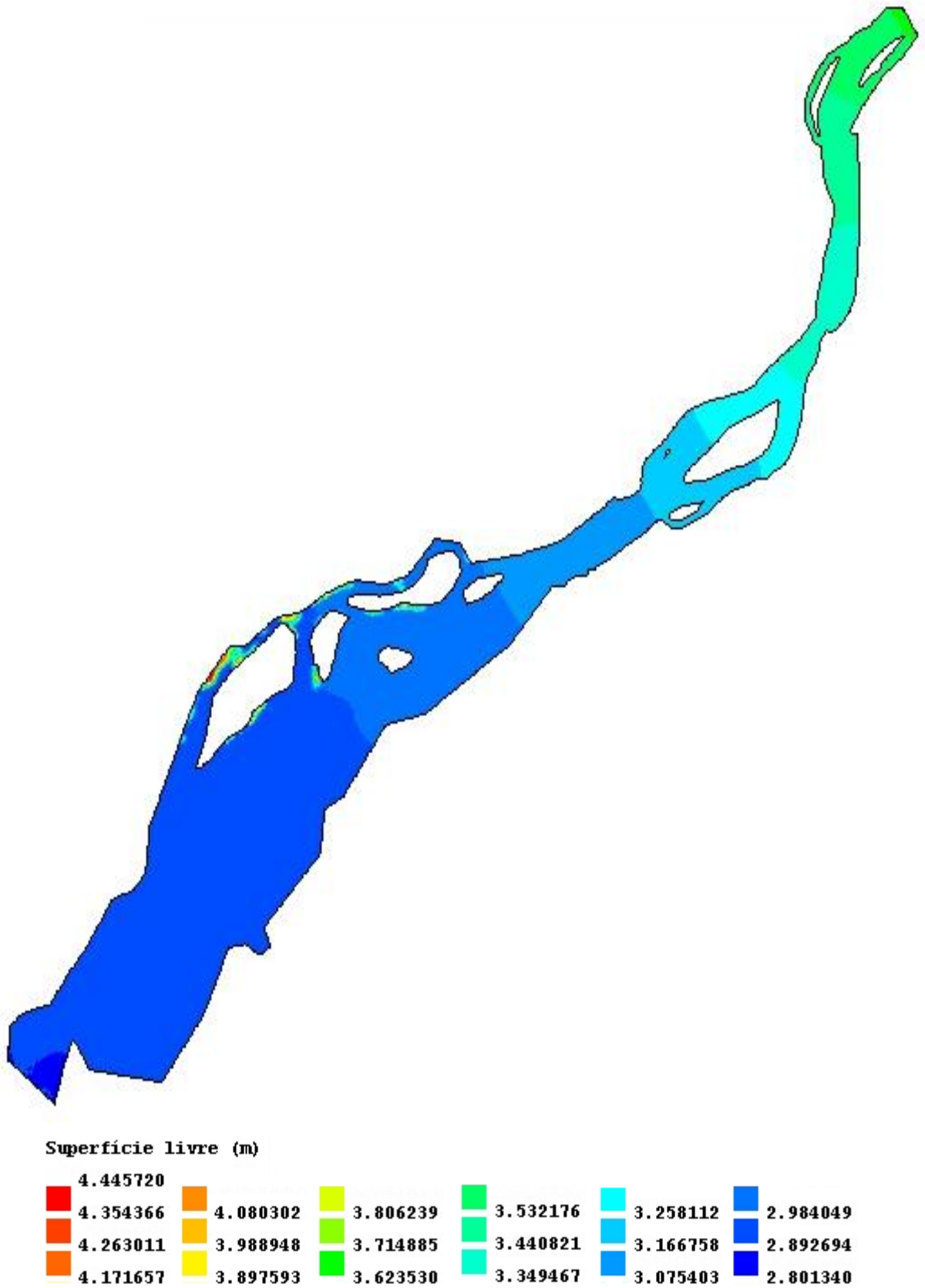


Fig.42 – Superfície livre no final da enchente – 521760 segundos.

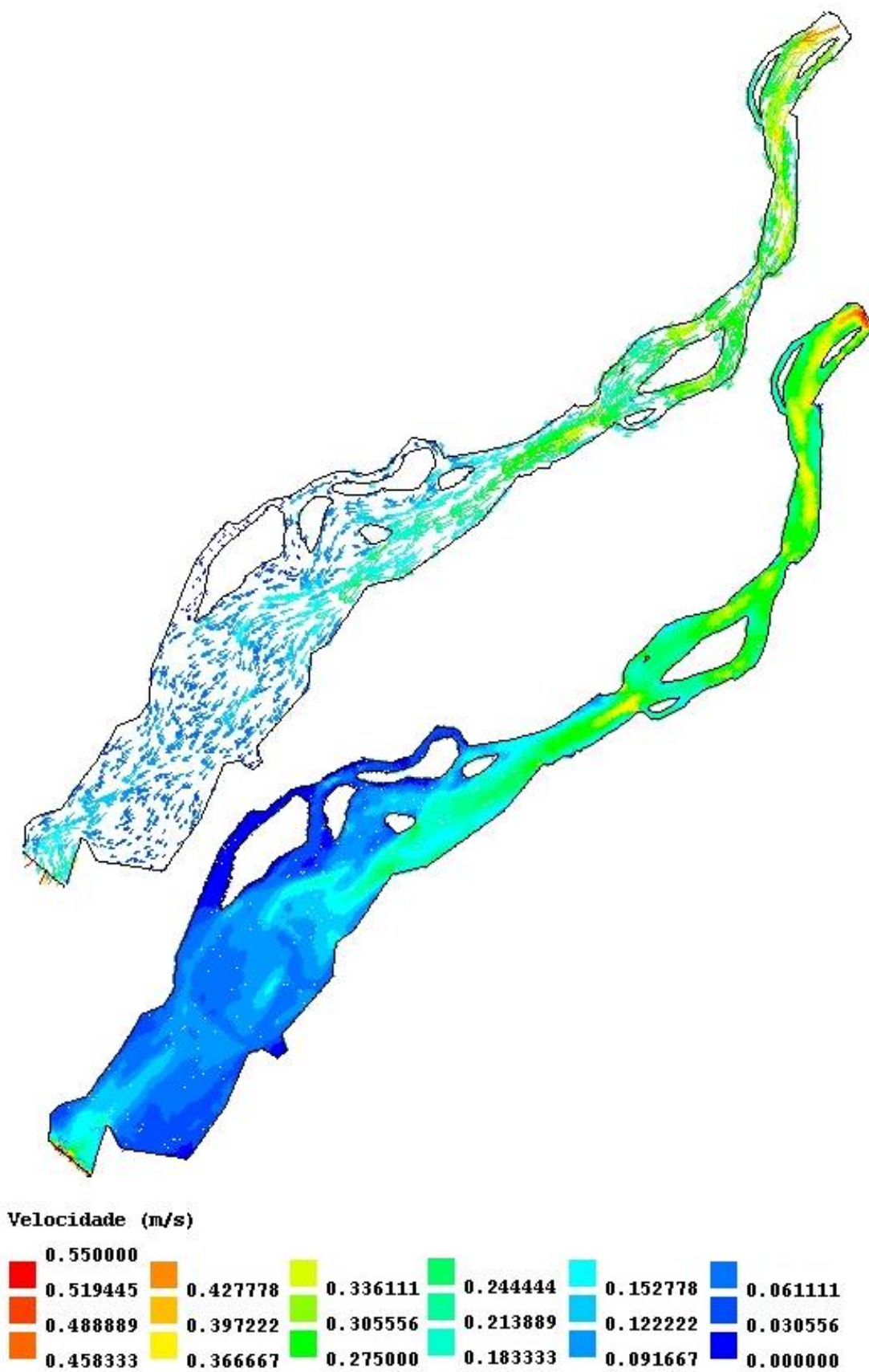


Fig.43 – Campo de velocidades no final da enchente – 521760 segundos.

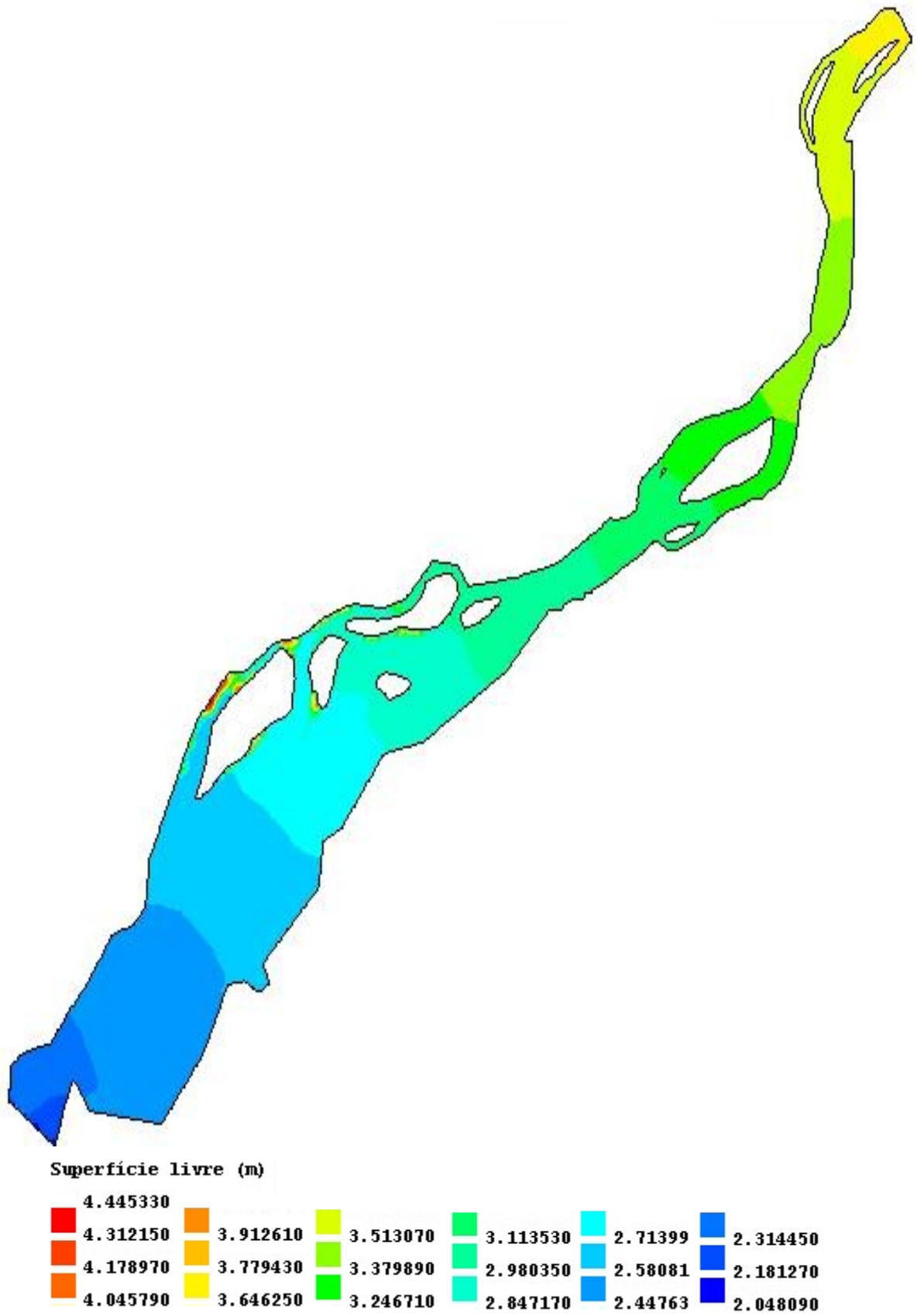


Fig.44 – Superfície livre na vazante – 537120 segundos.

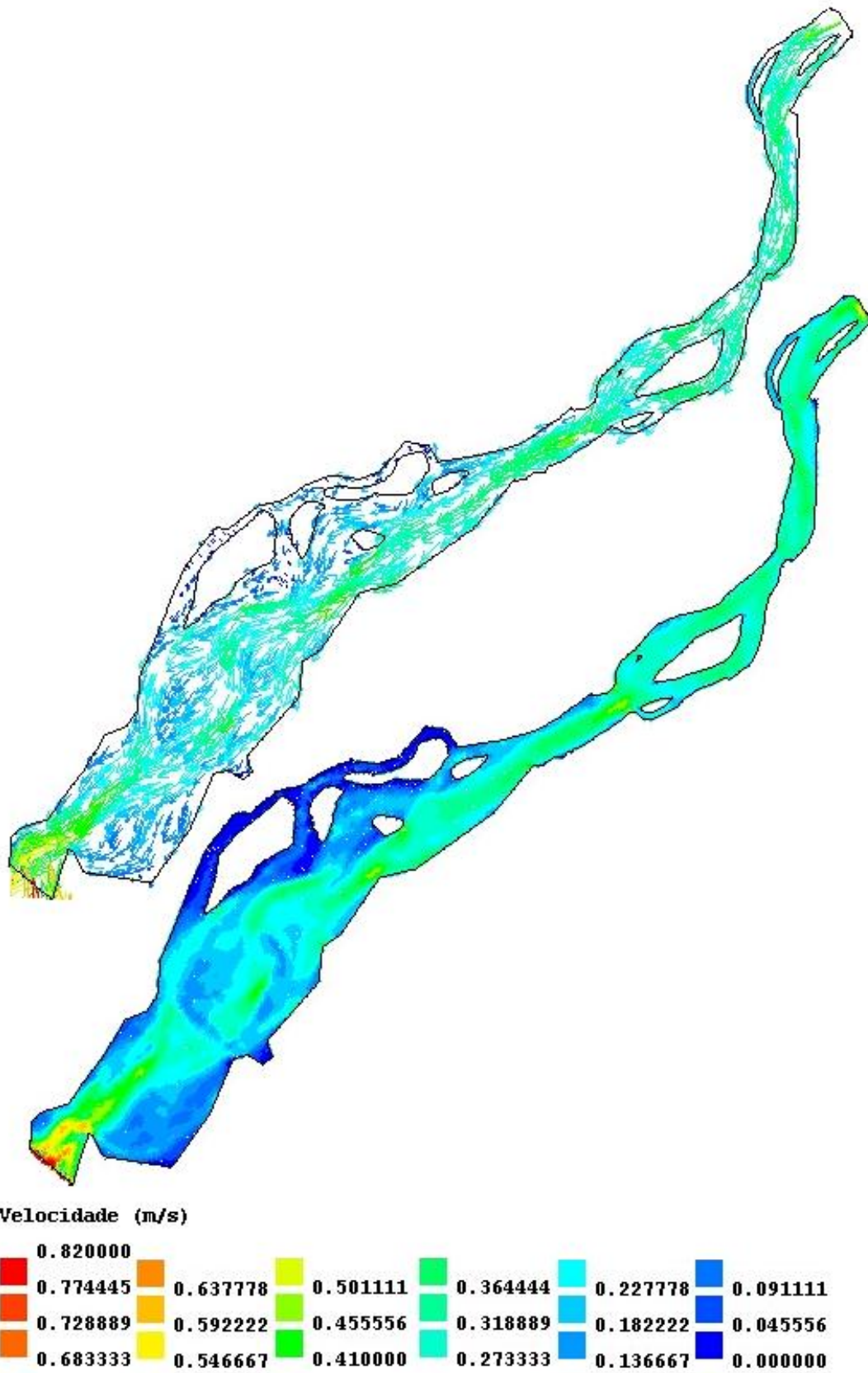
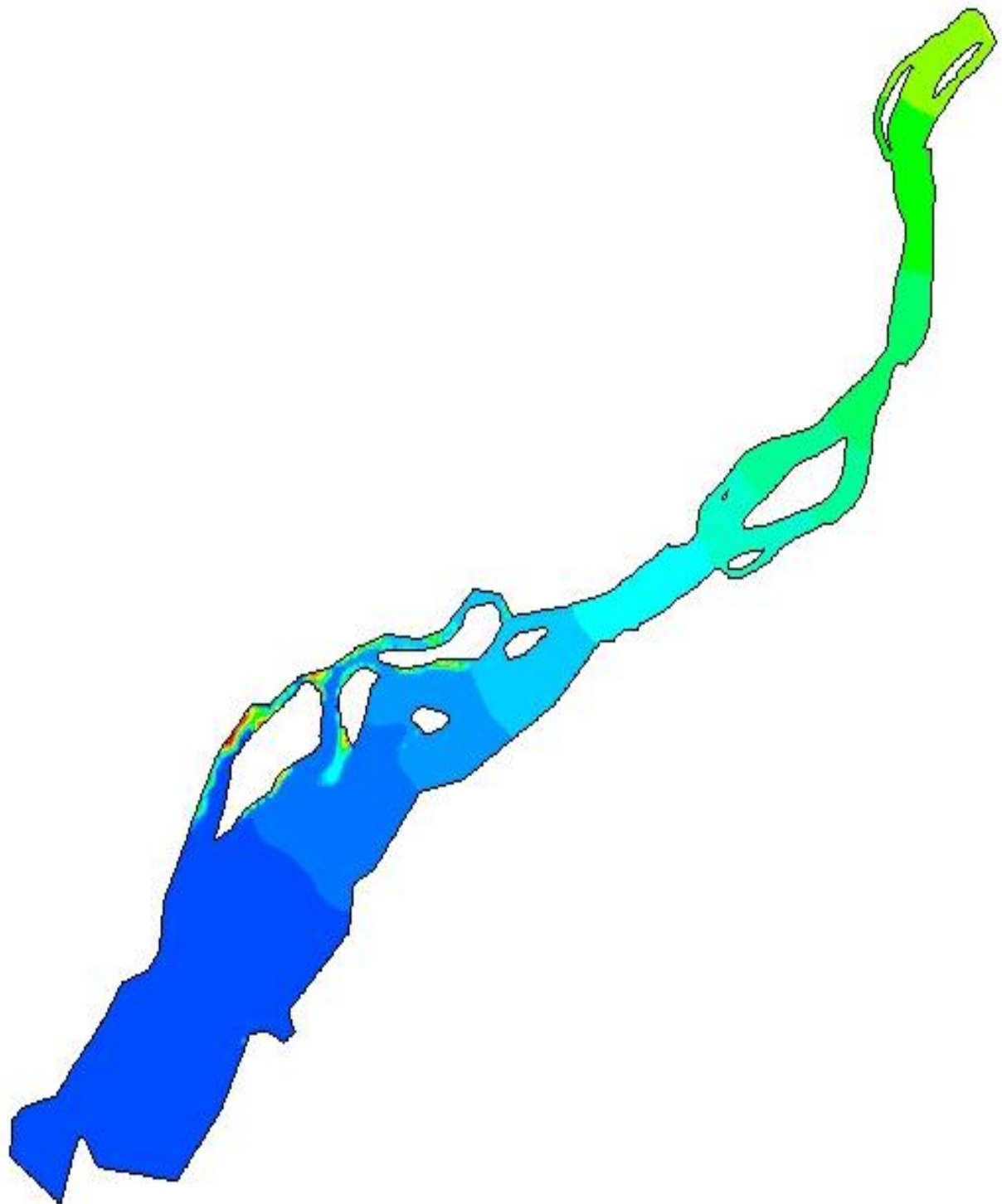


Fig.45 – Campo de velocidades na vazante – 537120 segundos.



**Superfície livre (m)**

4.445790					
4.315094	3.923008	3.530921	3.138834	2.746748	2.354661
4.184399	3.792312	3.400225	3.008139	2.616052	2.223966
4.053703	3.661617	3.269530	2.877443	2.485357	2.093270

Fig.46 – Superfície livre no final da vazante – 553920 segundos.

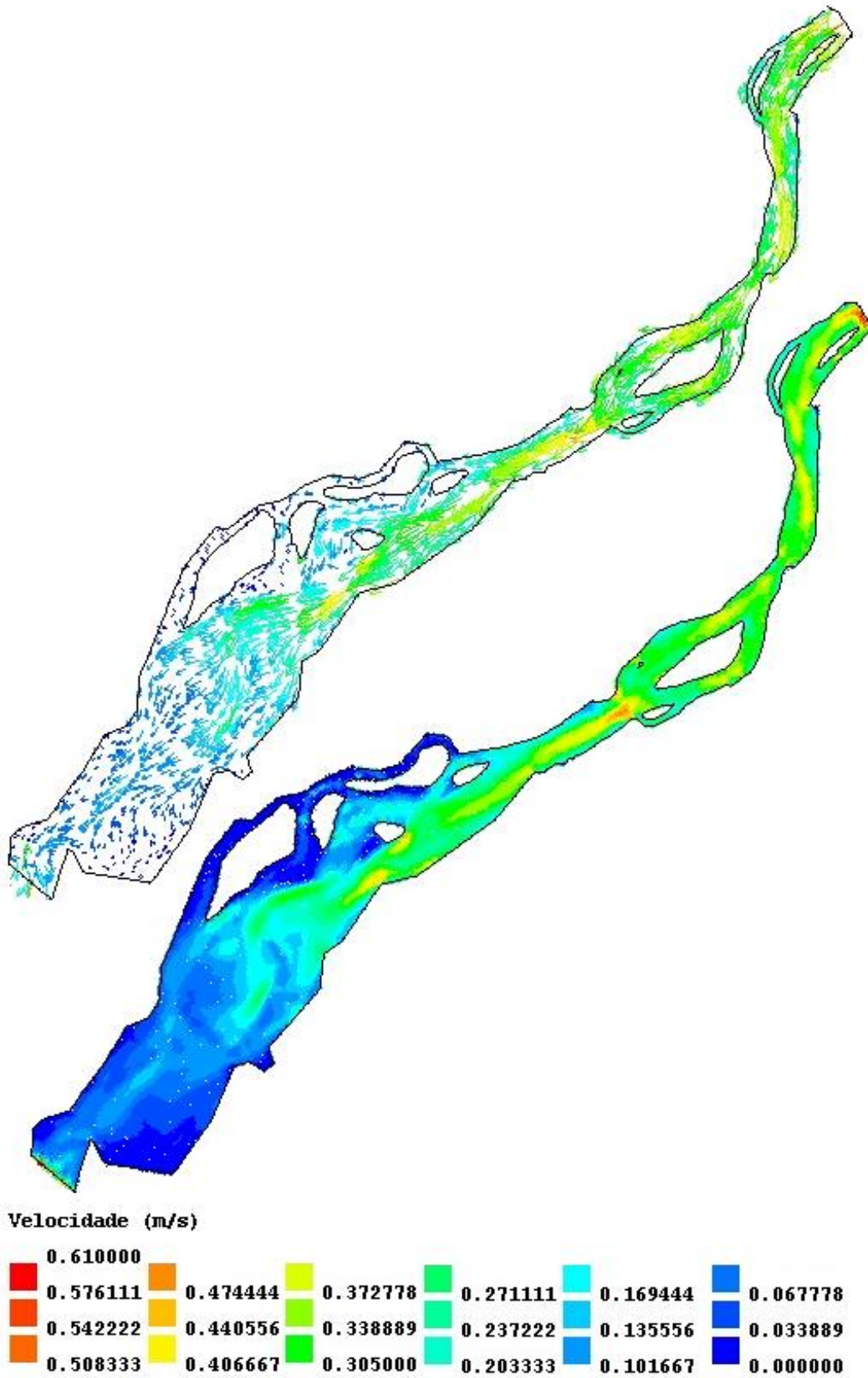


Fig.47 – Campo de velocidades no final da vazante – 553920 segundos.

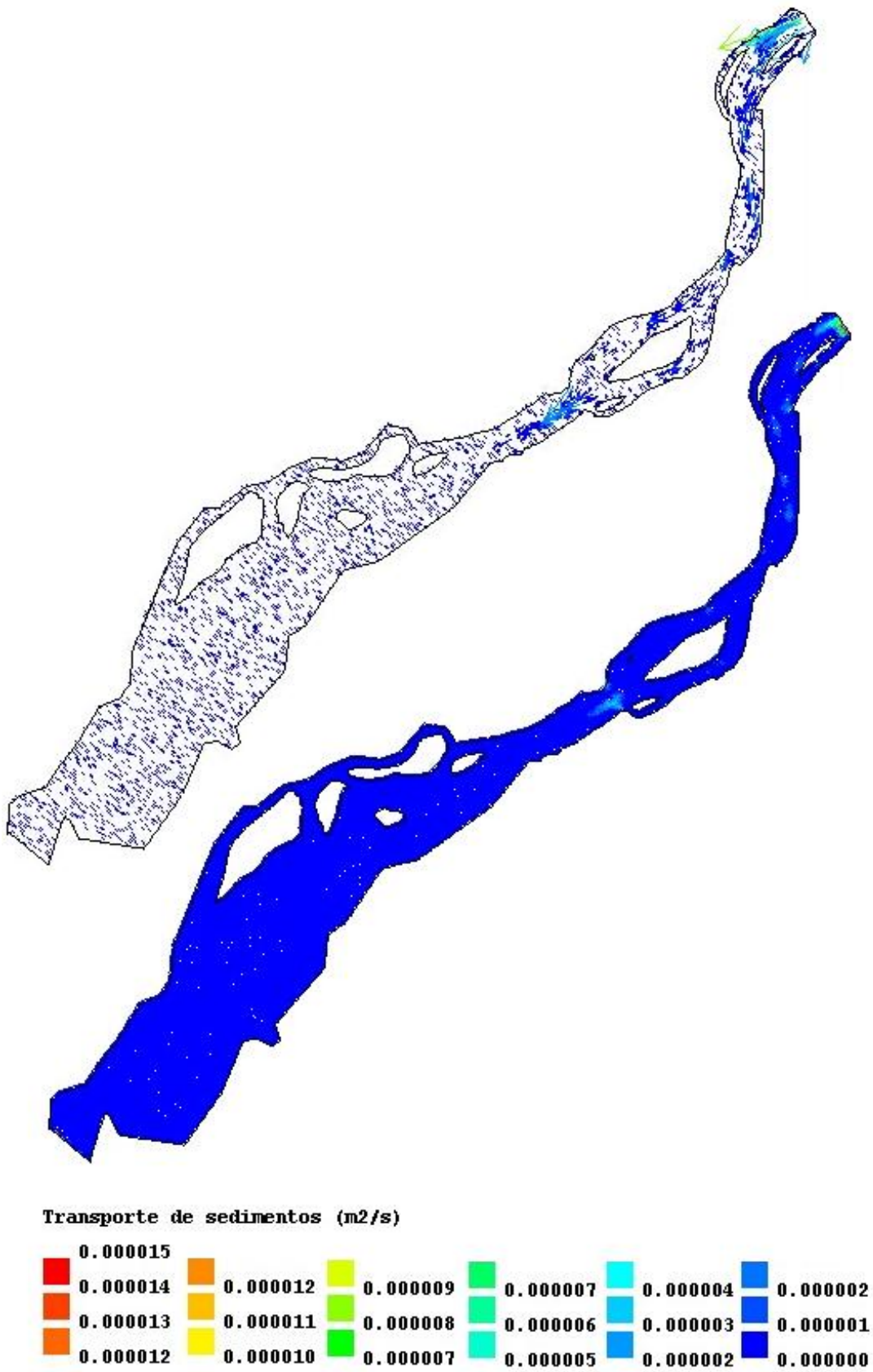


Fig.48 – Transporte de sedimentos na enchente – 511920 segundos.

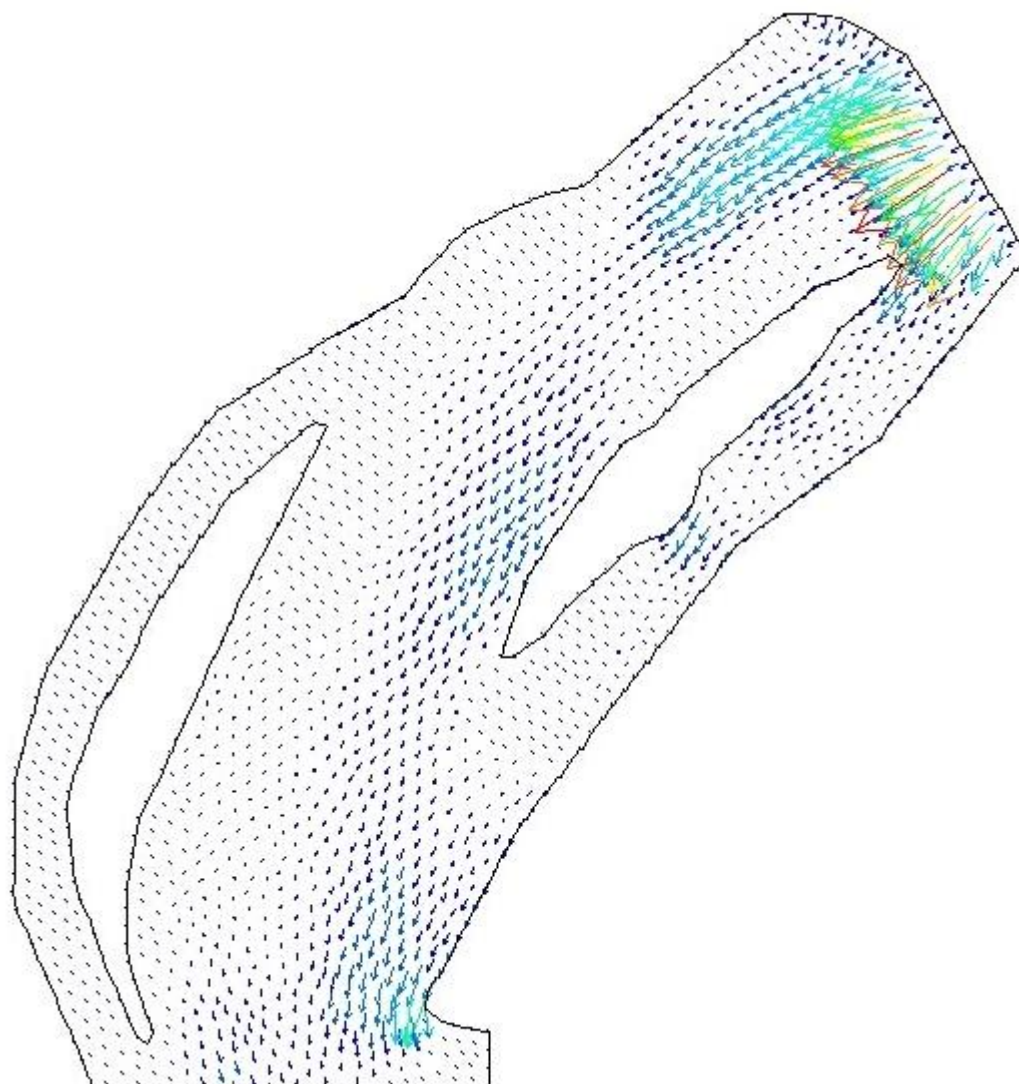


Fig.49 - Pormenor do transporte de sedimentos durante a enchente na entrada do modelo – 511920 segundos.

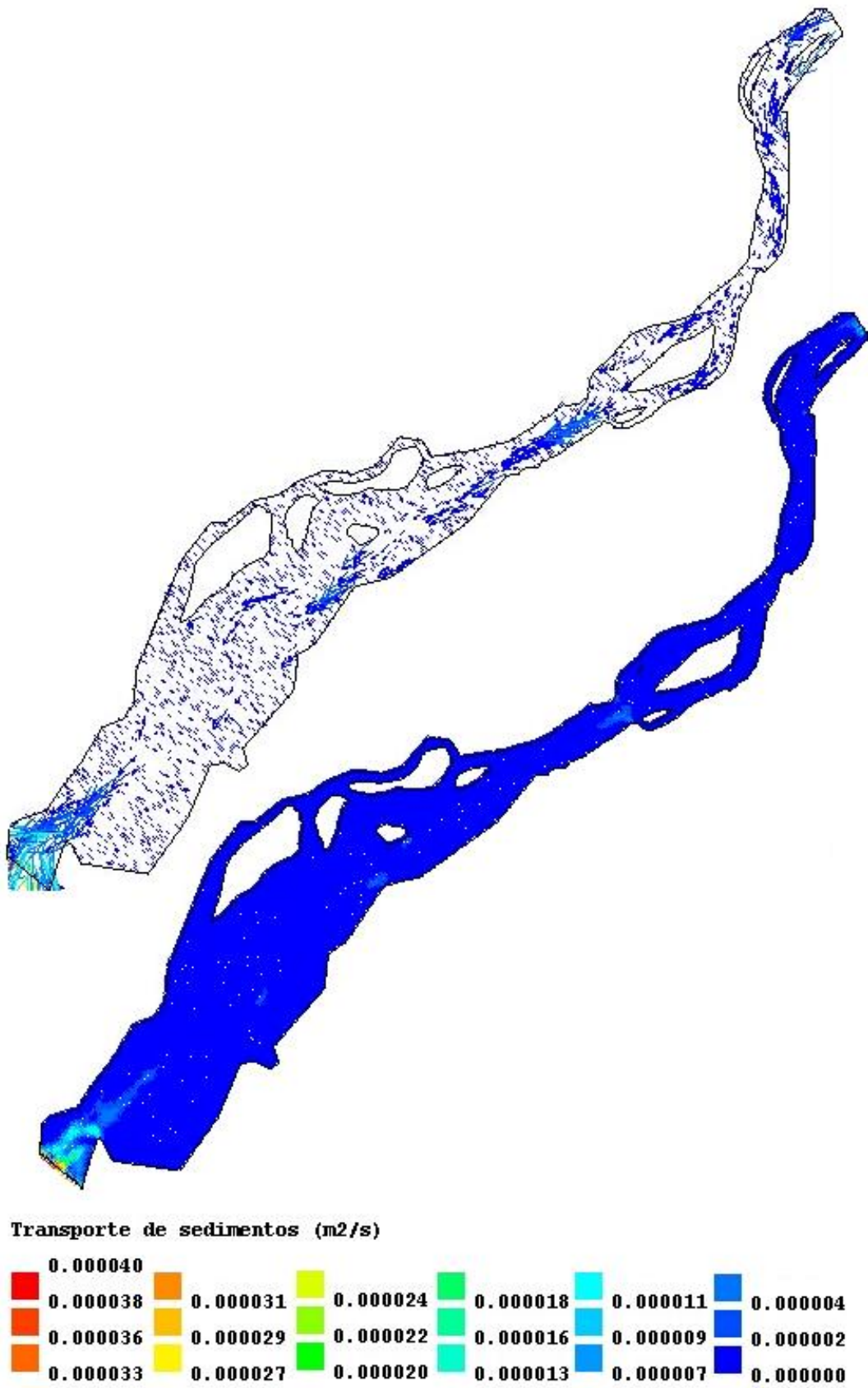


Fig.50 – Transporte de sedimentos na vazante – 536640 segundos.

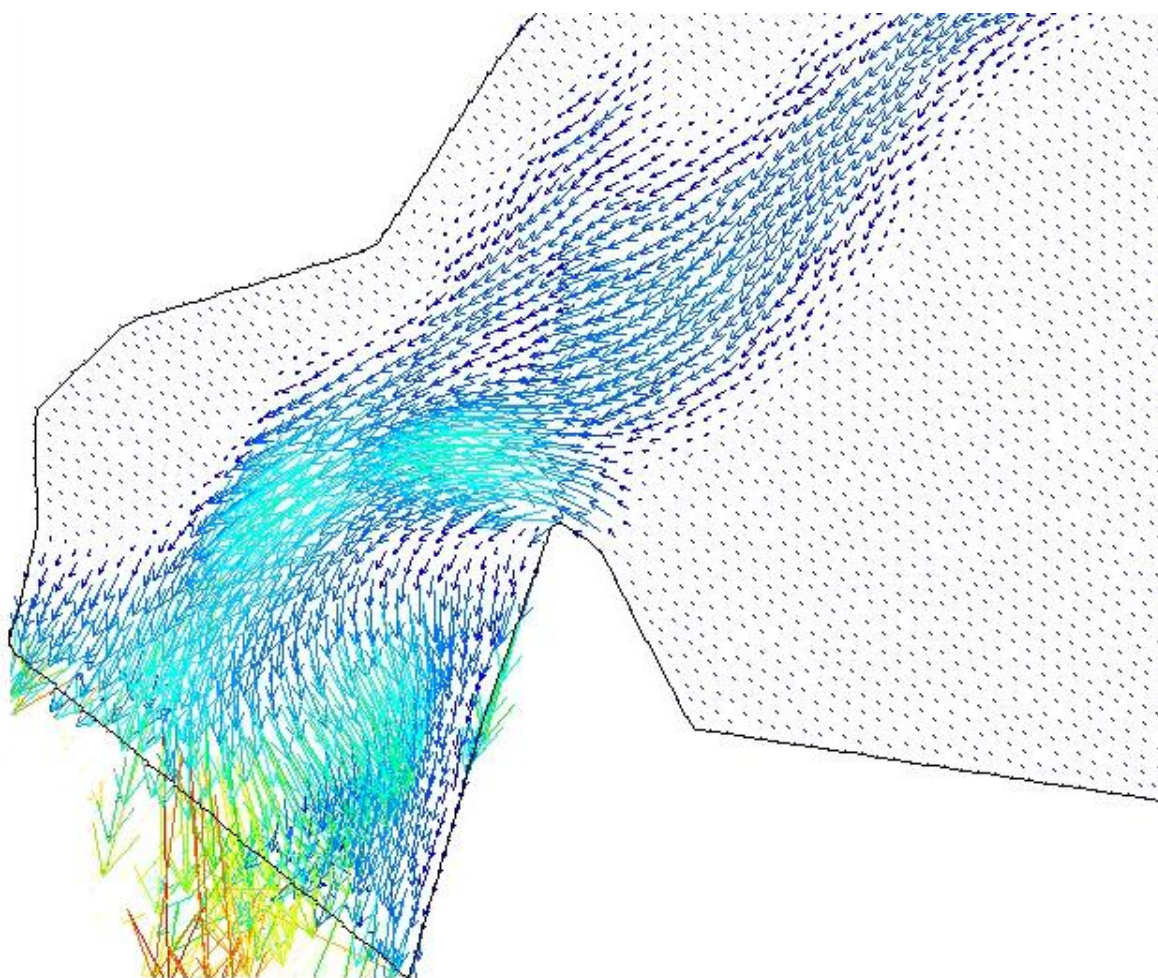


Fig.51 - Pormenor do transporte de sedimentos na embocadura durante a vazante – 536640 segundos.

CAUDAL MÍNIMO EM MARÉ VIVA – SETEMBRO DE 2005

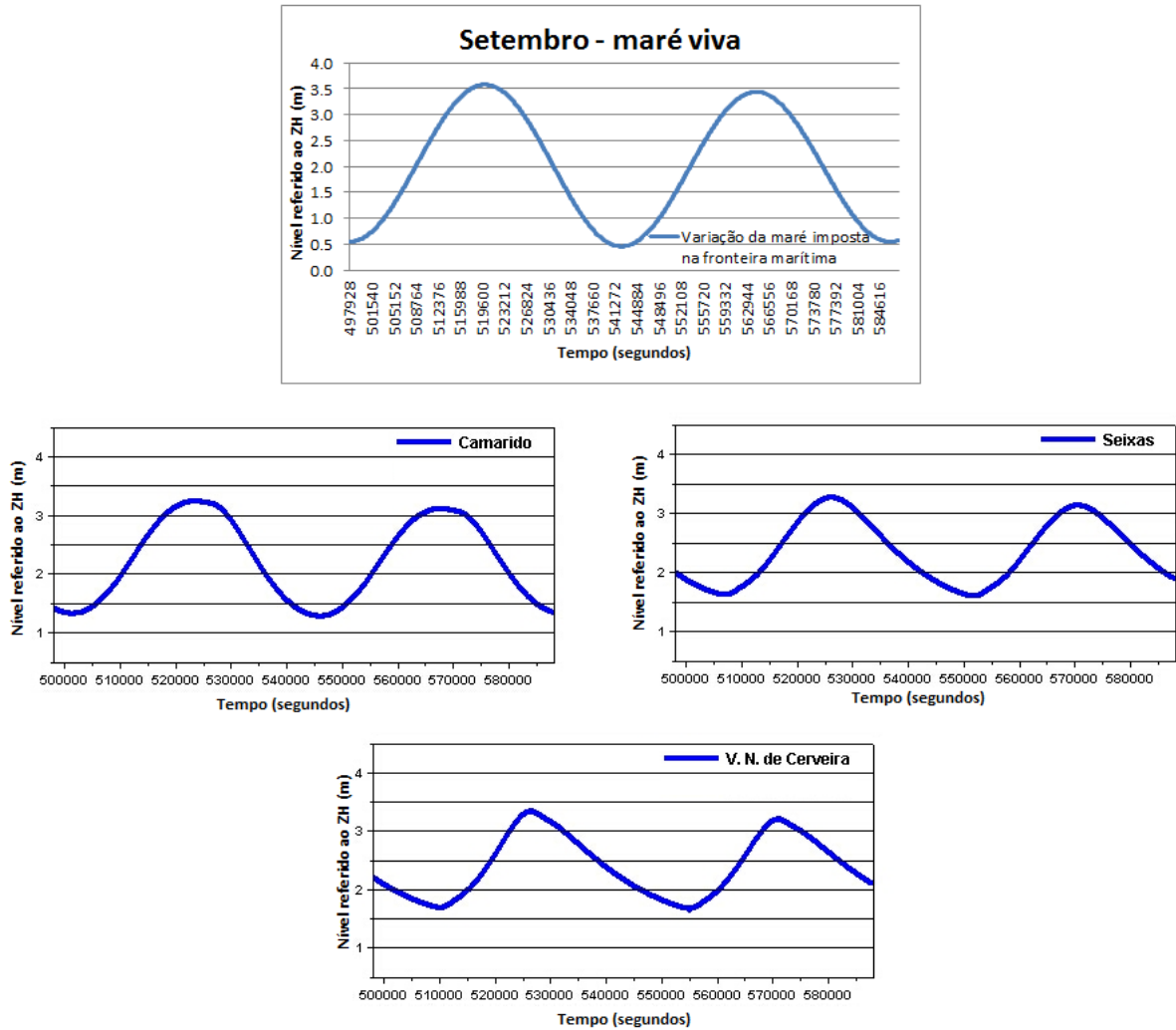


Fig.52 – Propagação da maré viva em Setembro de 2005: a) imposta na fronteira marítima; b) Camarido; c) Seixas; d) V. N. de Cerveira.

Tabela 5 – Instantes em que foram apresentados resultados para a superfície livre, campo de velocidades e transporte de sedimentos.

<b>Caudal = 60,00 m<sup>3</sup>/s</b>	
	Instante (segundos)
<b>Superfície livre/Campos de velocidades</b>	
enchente	518640
fim da enchente	526080
vazante	541200
fim da vazante	550800
<b>Transporte de sedimentos</b>	
enchente	515280
vazante	530400

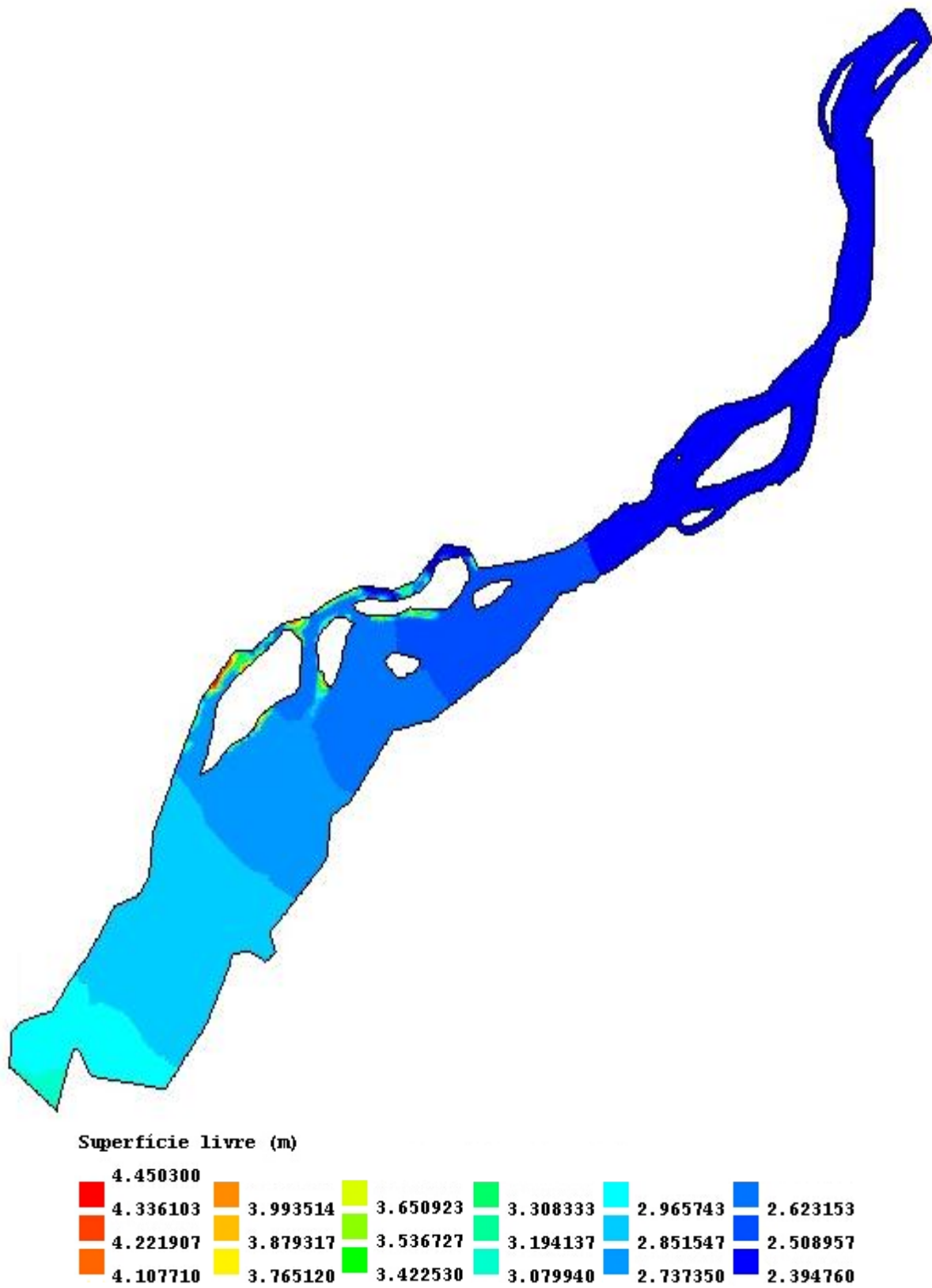


Fig.53 – Superfície livre na enchente – 518640 segundos.

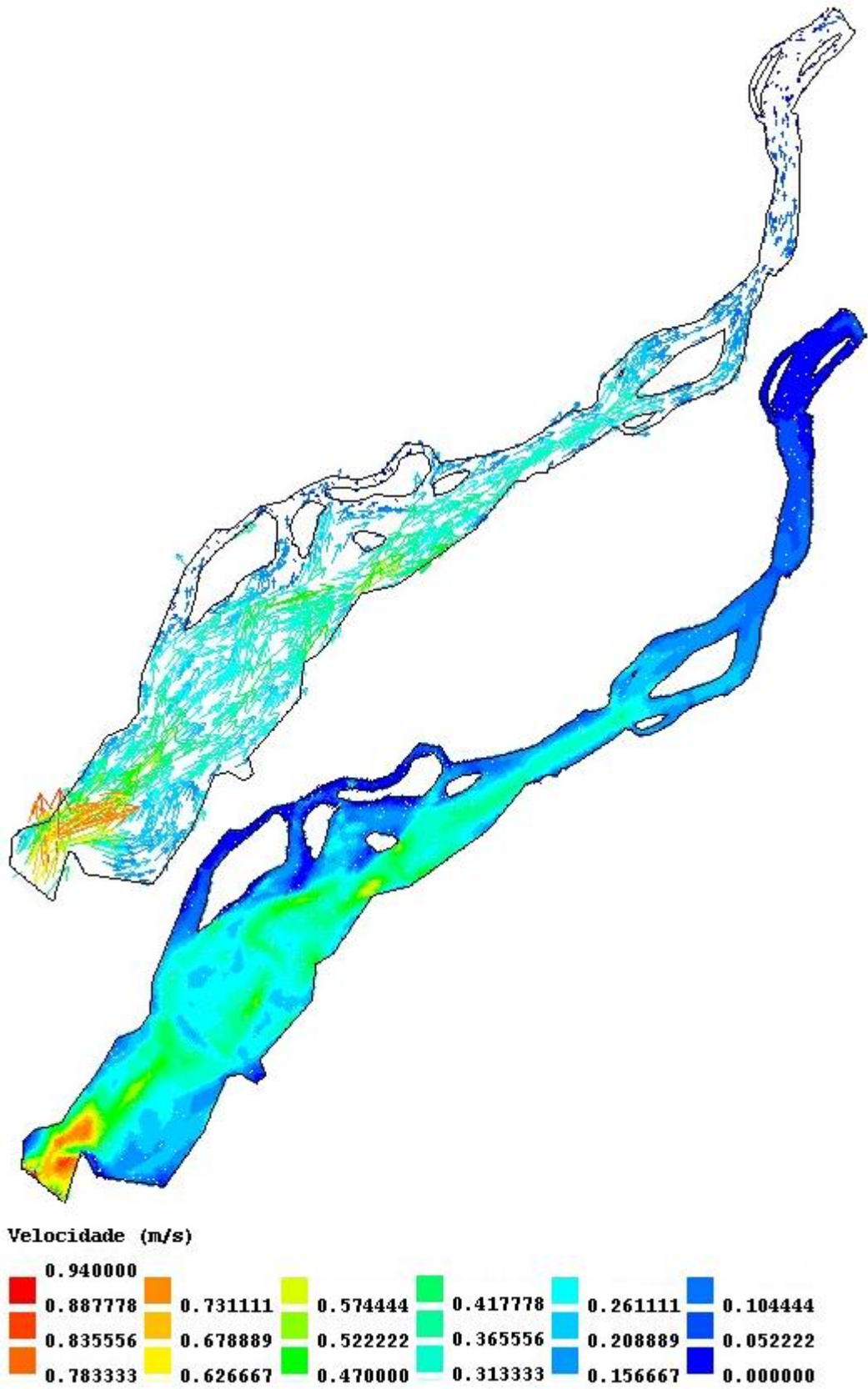
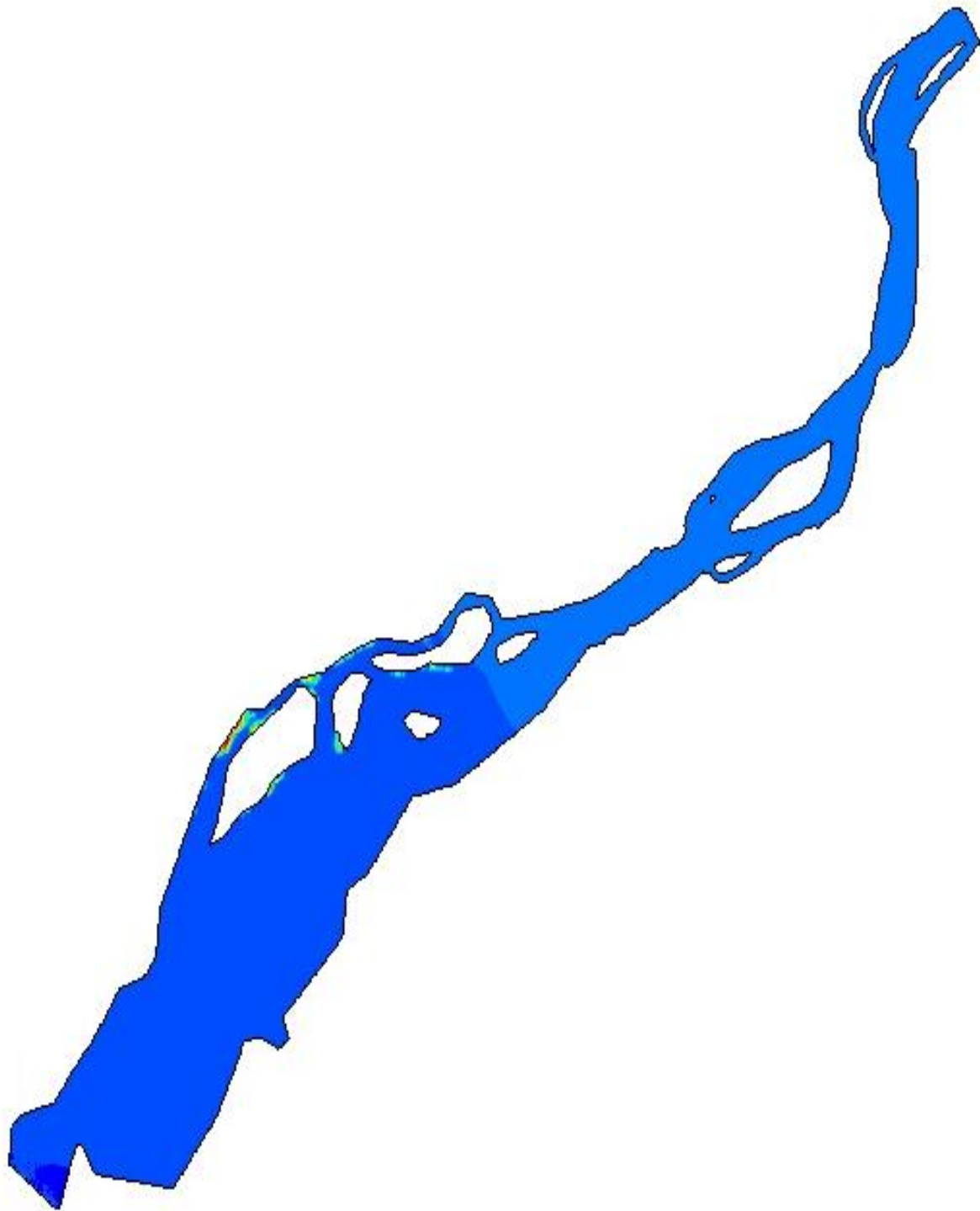


Fig.54 – Campo de velocidades na enchente – 518640 segundos.



Superfície livre (m)

4.445800					
4.372749	4.153595	3.934442	3.715289	3.496136	3.276982
4.299698	4.080544	3.861391	3.642238	3.423084	3.203931
4.226646	4.007493	3.788340	3.569187	3.350033	3.130880

Fig.55 – Superfície livre no final da enchente – 526080 segundos.

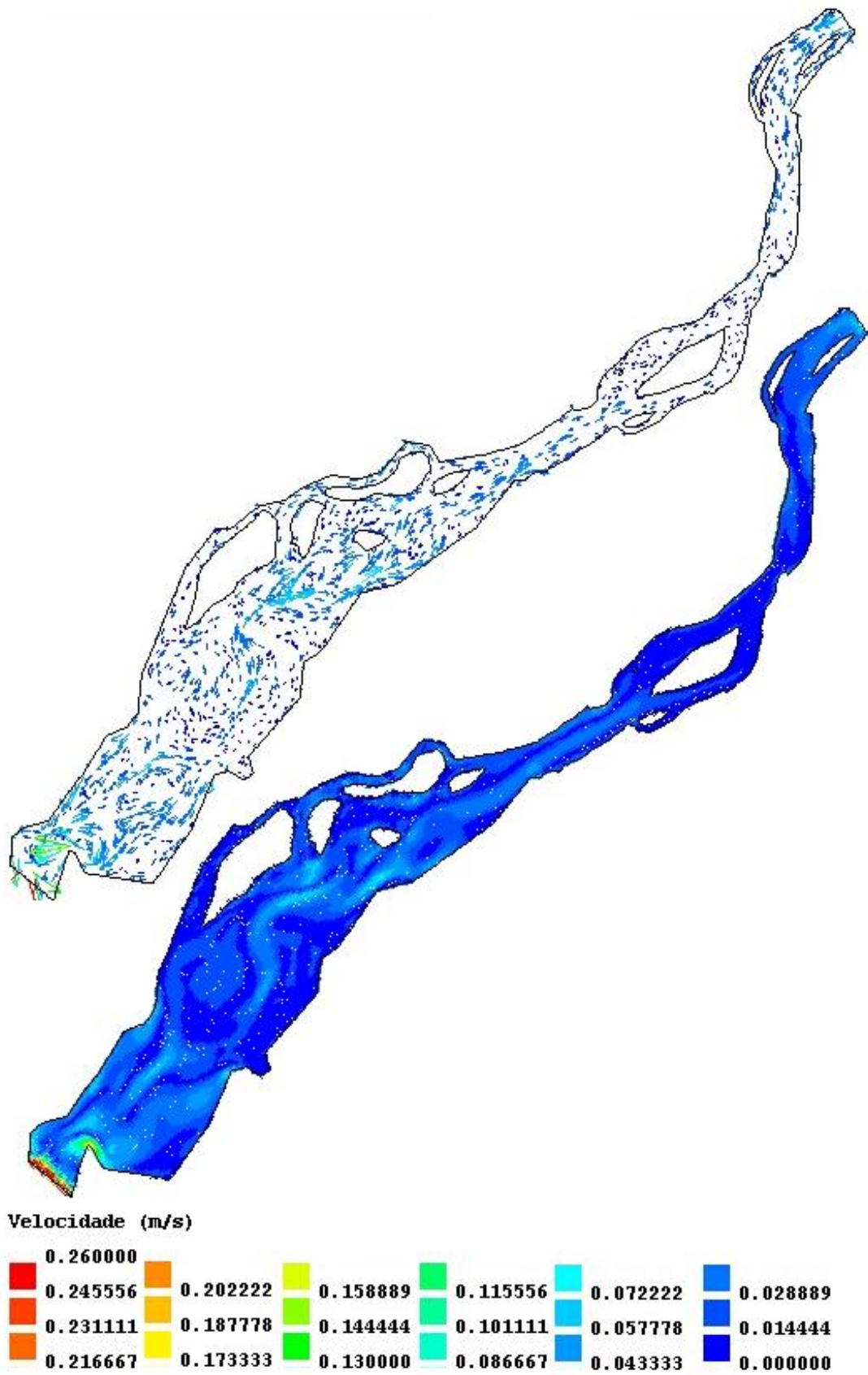


Fig.56 – Campo de velocidades no final da enchente – 526080 segundos.

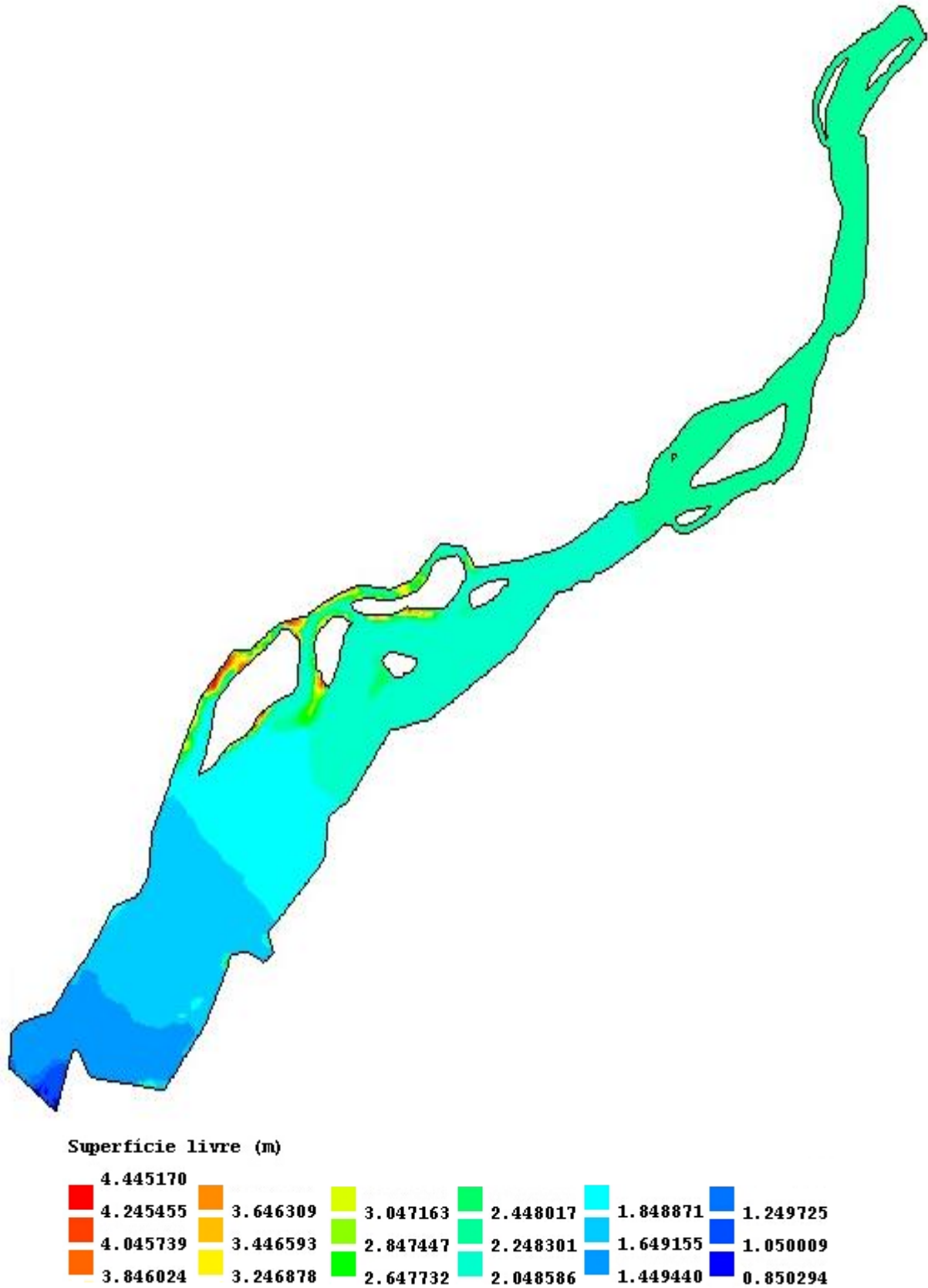


Fig.57 – Superfície livre na vazante – 541200 segundos.

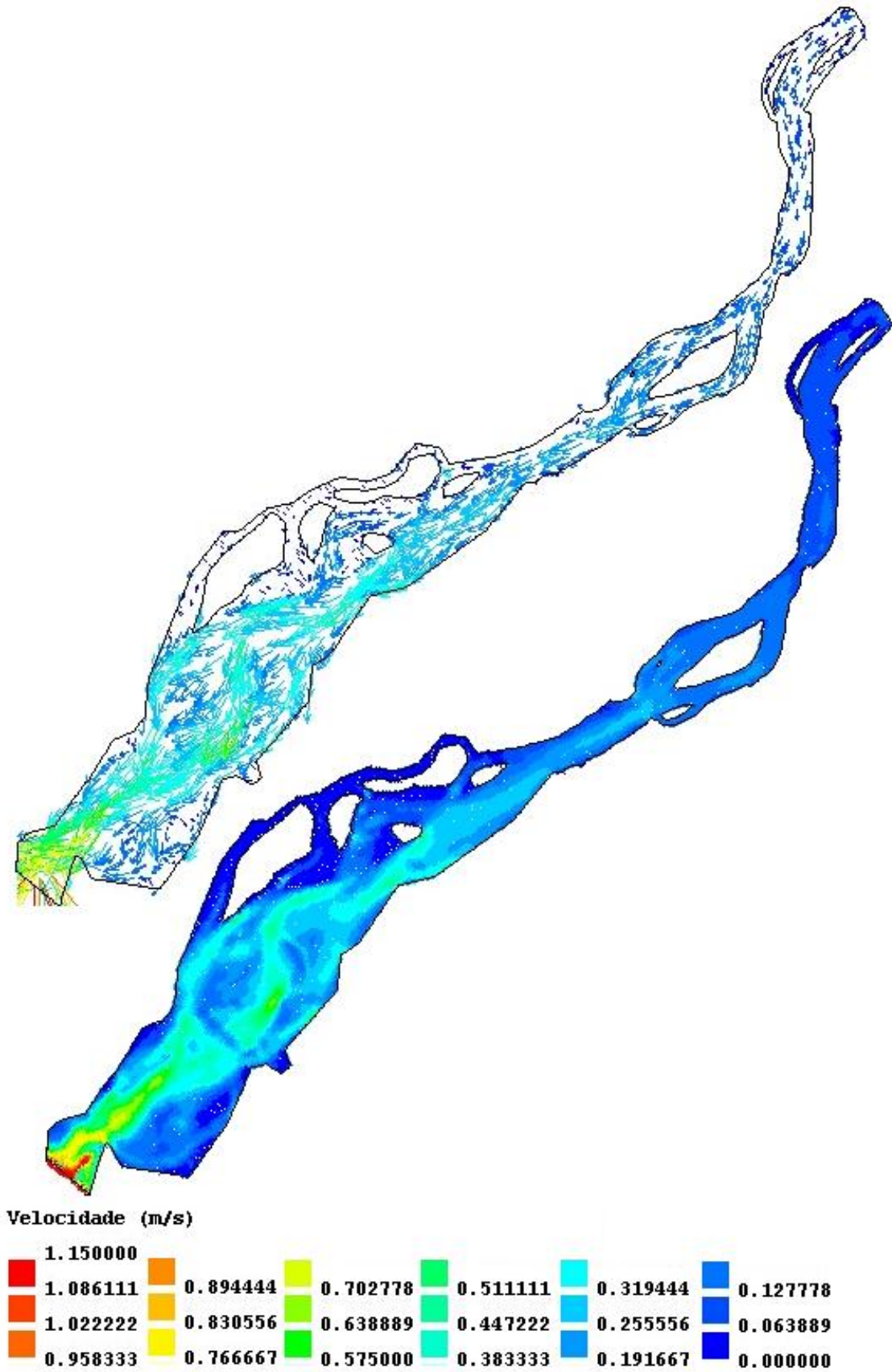


Fig.58 – Campos de velocidades na vazante – 541200 segundos.

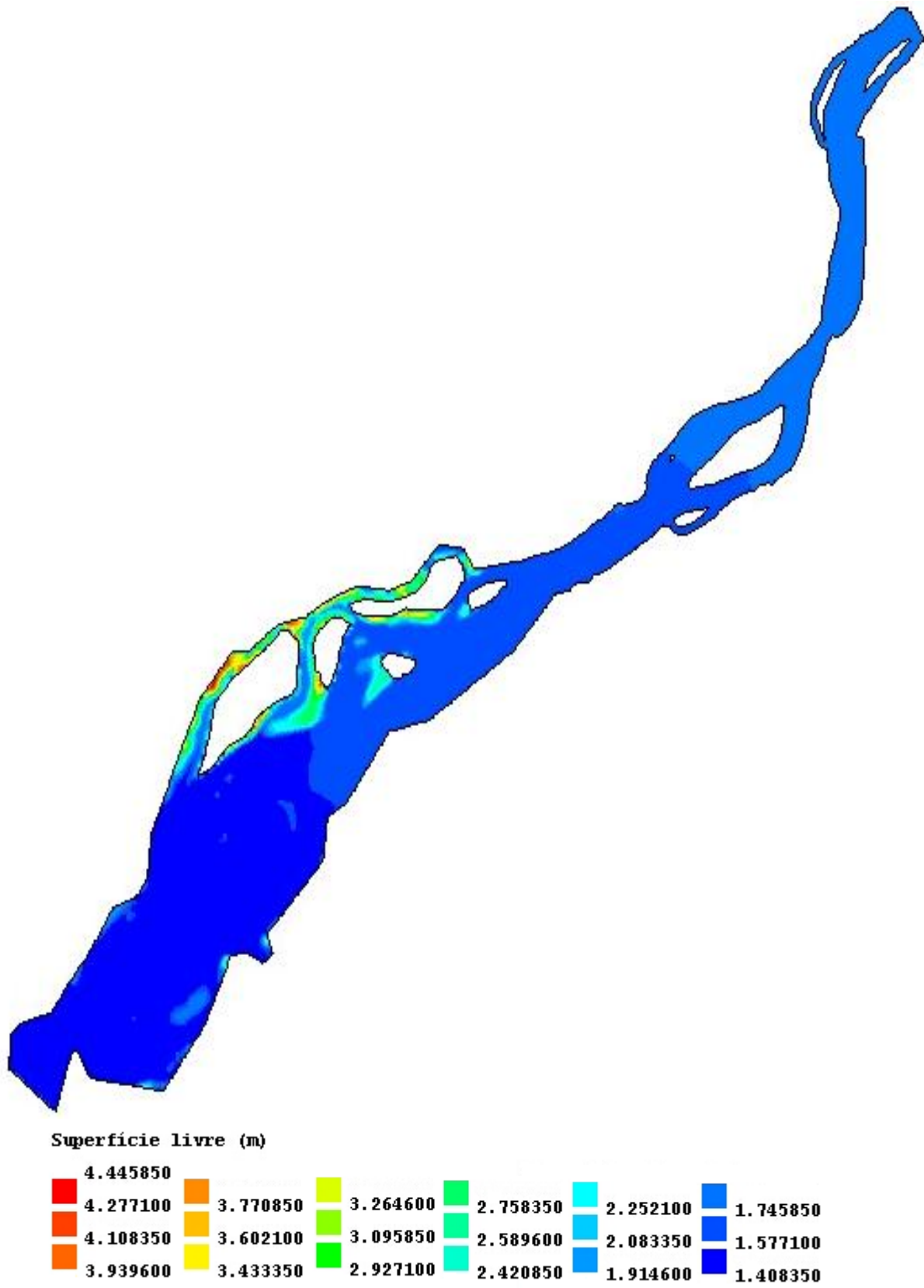


Fig.59 – Superfície livre no final da vazante – 550800 segundos.

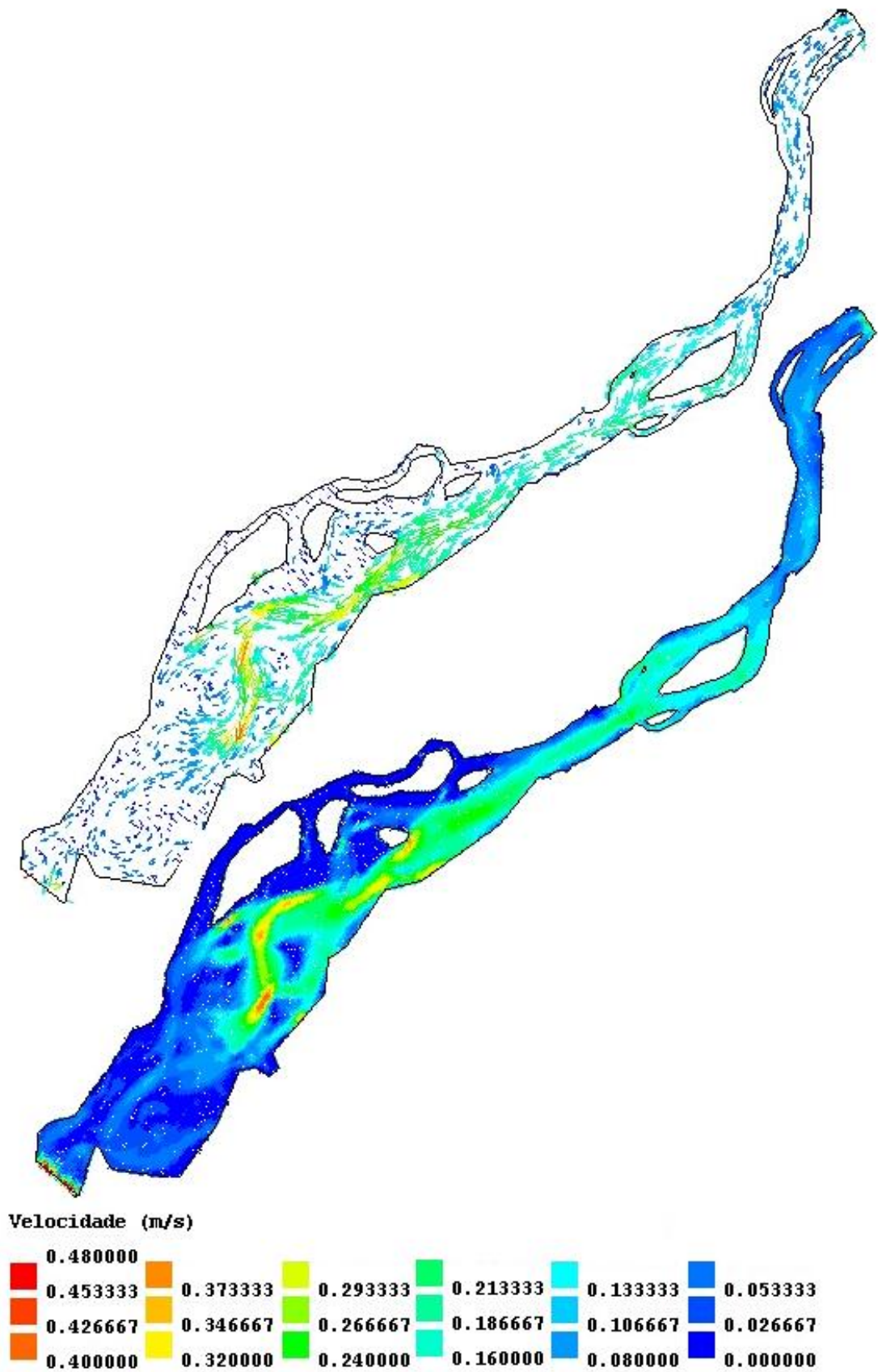


Fig.60 – Campo de velocidades no final da vazante – 550800 segundos.

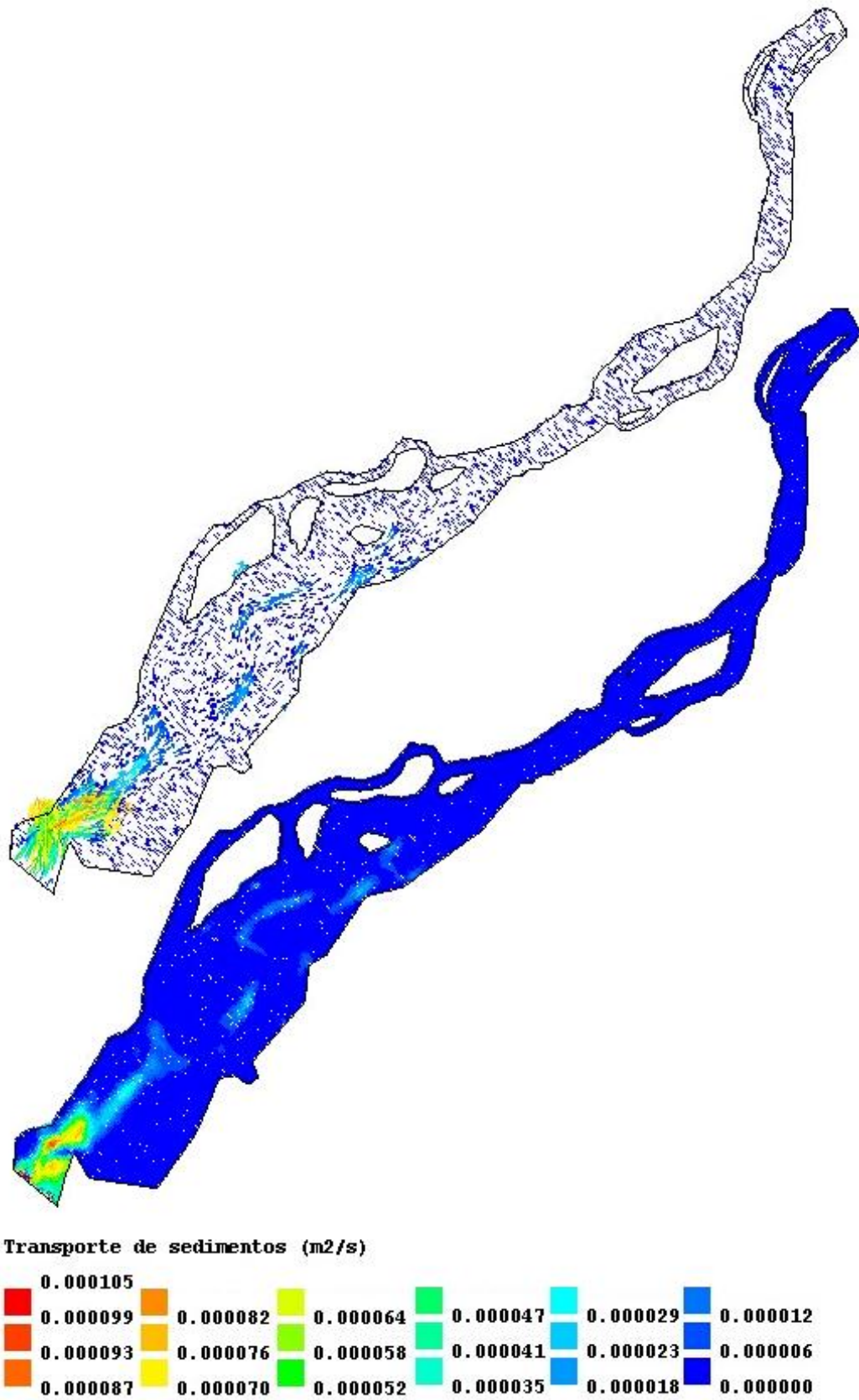


Fig.61 – Transporte de sedimentos na enchente – 515280 segundos.

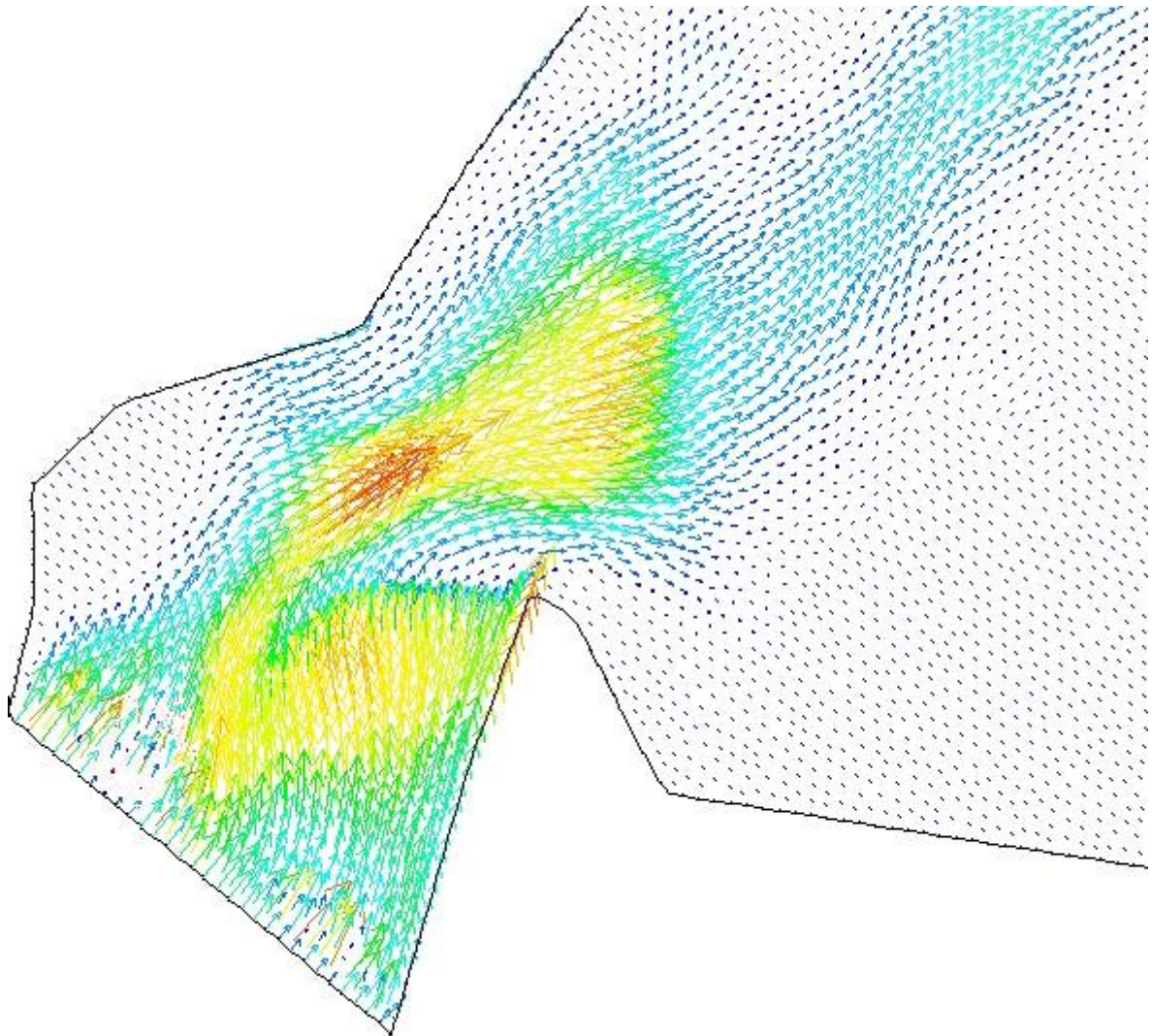


Fig.62 – Pormenor do transporte de sedimentos na embocadura durante a enchente - 515280 segundos.

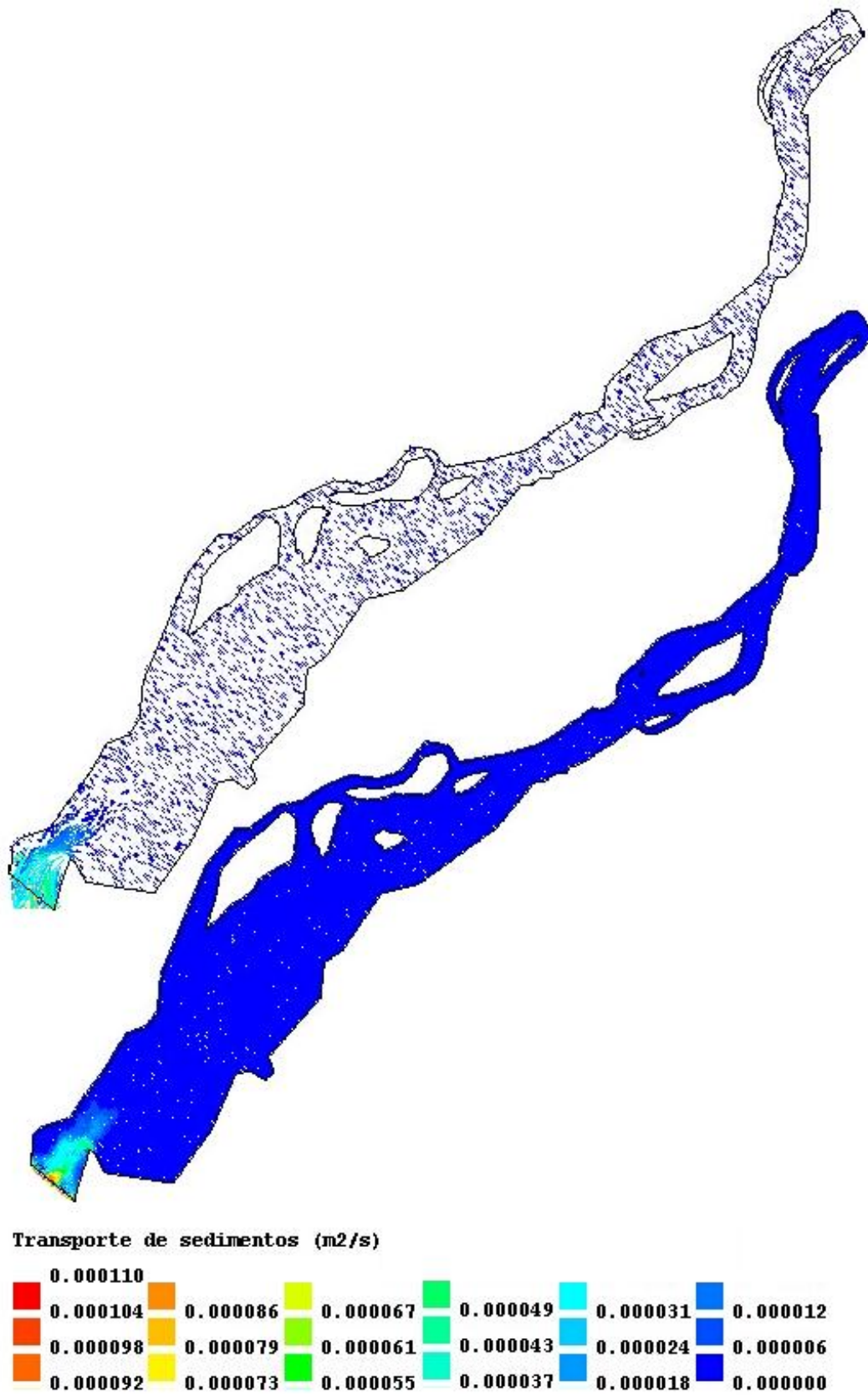


Fig.63 – Transporte de sedimentos na vazante – 530400 segundos.

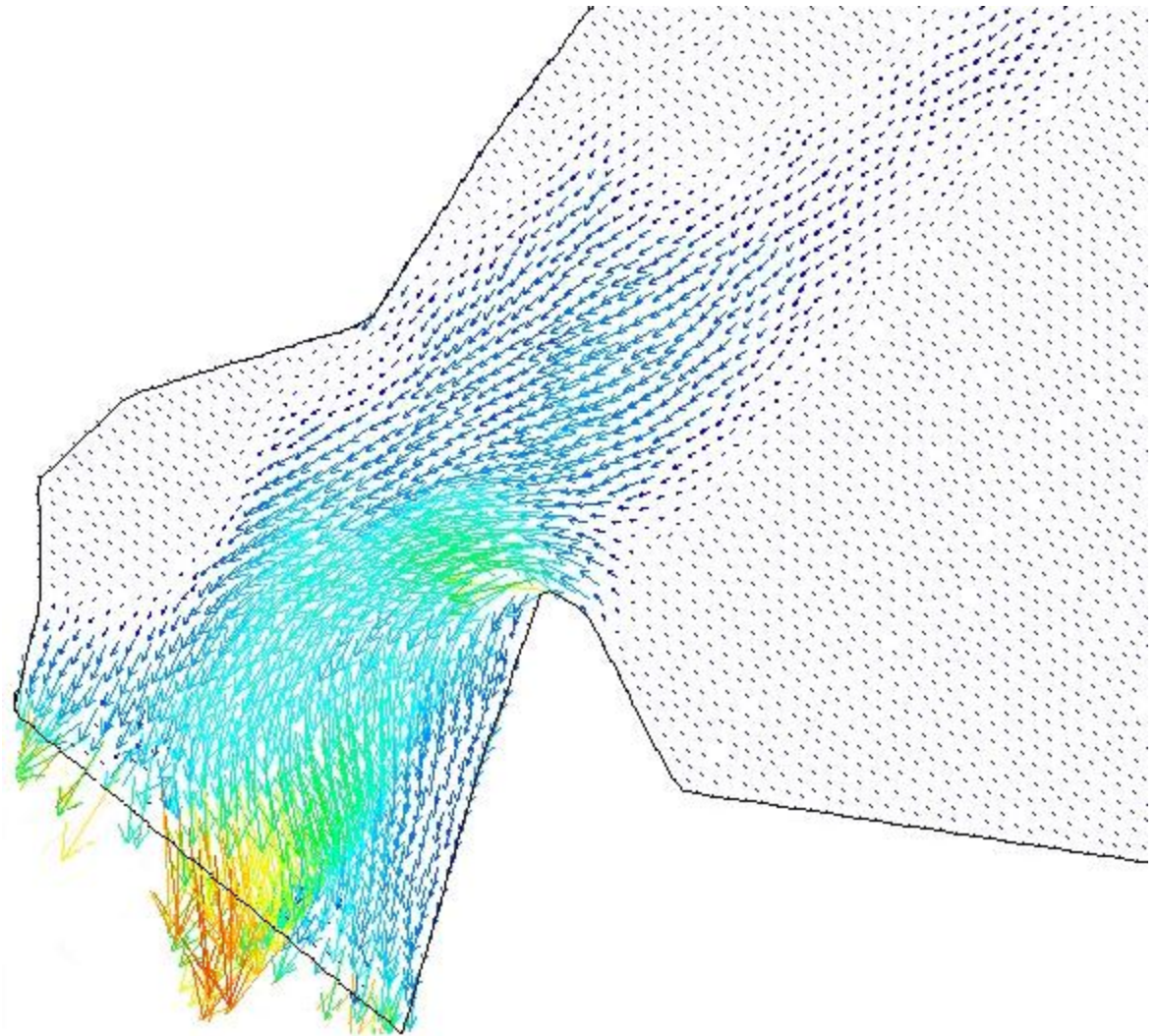


Fig.64 – Pormenor do transporte de sedimentos na embocadura durante a vazante - 530400 segundos.

4.8.1 CAUDAL MÍNIMO EM MARÉ MORTA – SETEMBRO DE 2005

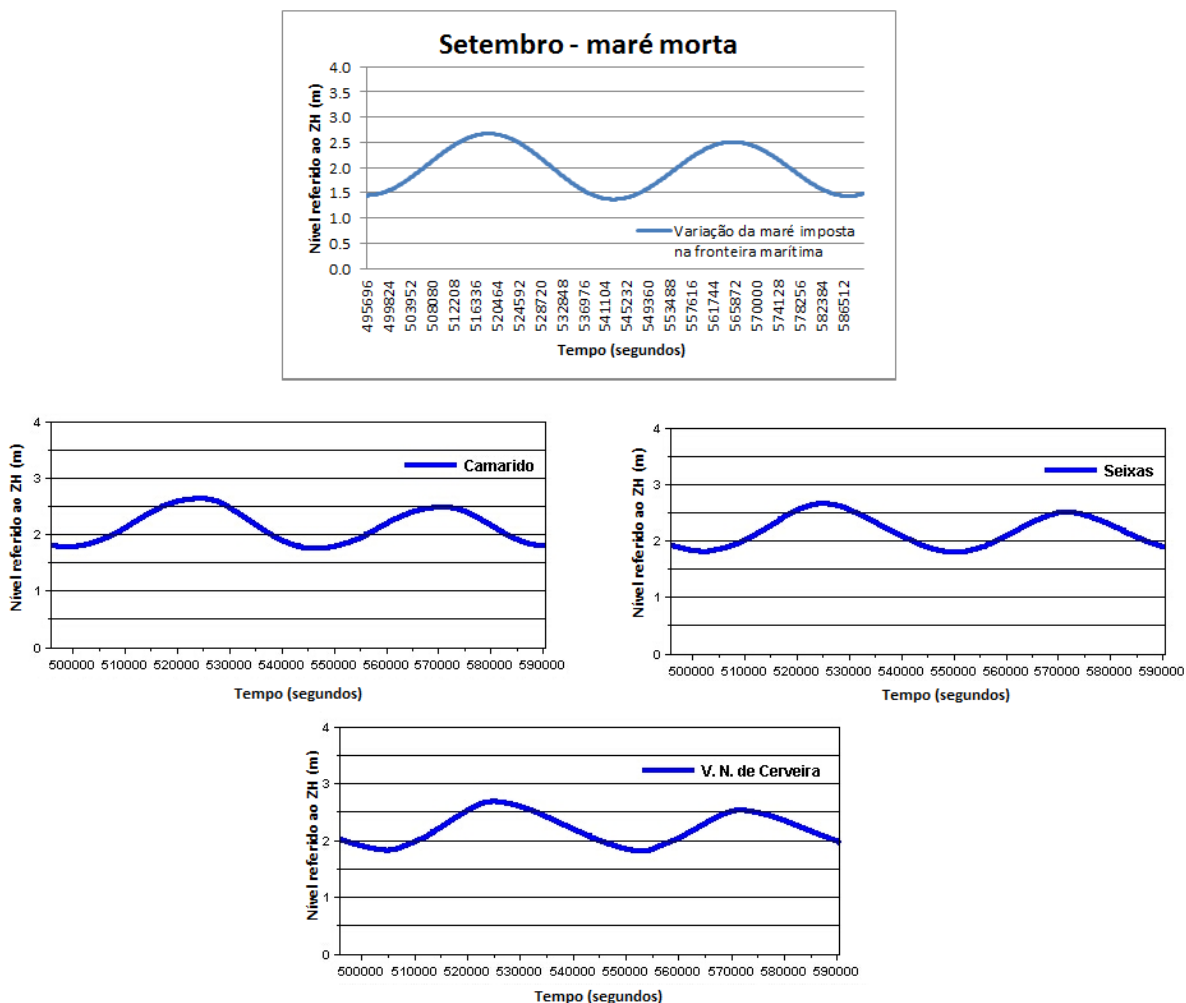


Fig.65 – Propagação da maré morta em Setembro de 2005: a) imposta na fronteira marítima; b) Camarido; c) Seixas; d) V. N. de Cerveira.

Tabela 6 – Instantes em que foram apresentados resultados para a superfície livre, campos de velocidades e transporte de sedimentos.

<b>Caudal = 60,00 m³/s</b>	Instante (segundos)
<b>Superfície livre/Campos de velocidades</b>	
enchente	516000
fim da enchente	524400
vazante	536400
fim da vazante	549360
<b>Transporte de sedimentos</b>	
enchente	515760
vazante	536160

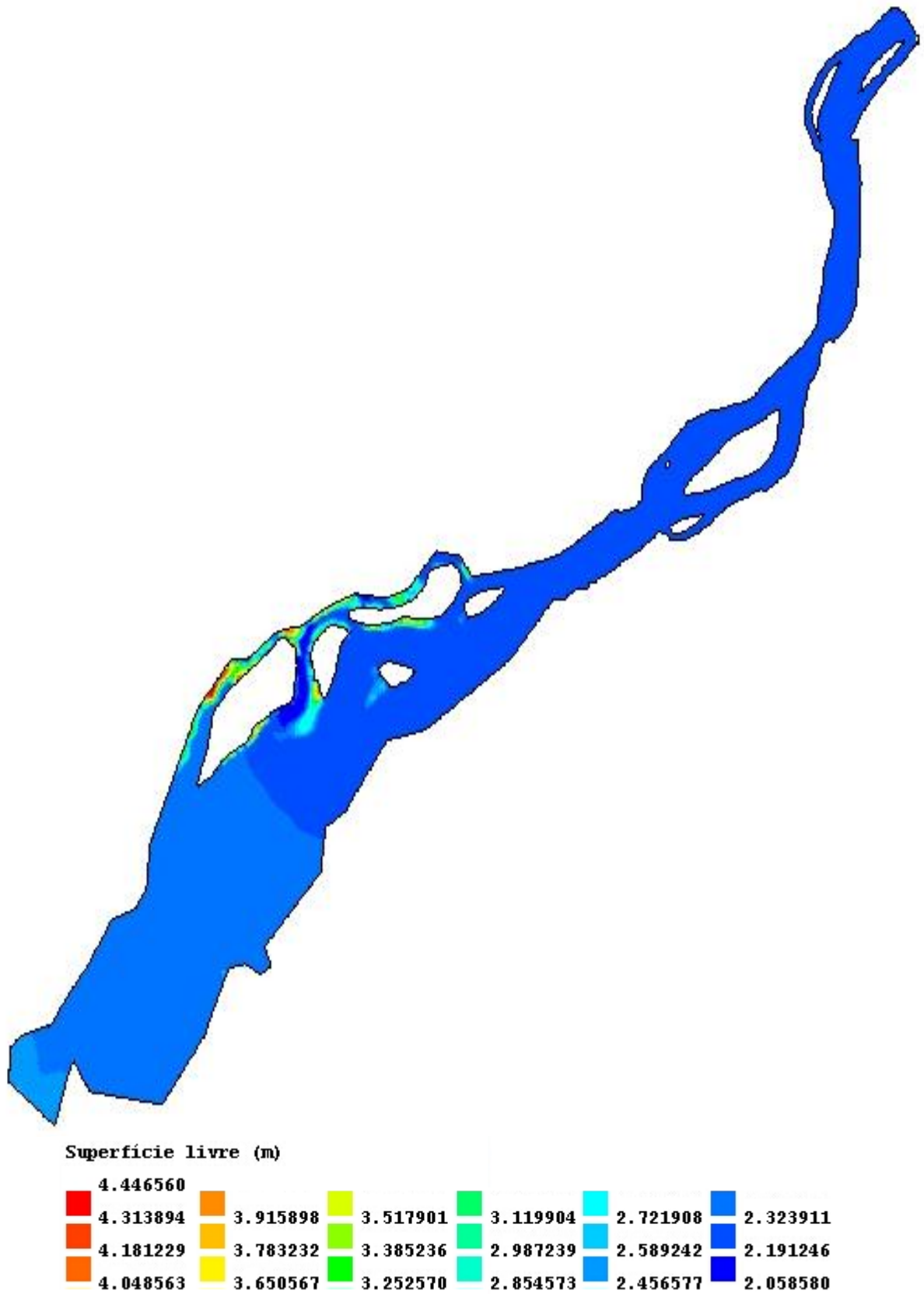


Fig.66 – Superfície livre na enchente – 516000 segundos.

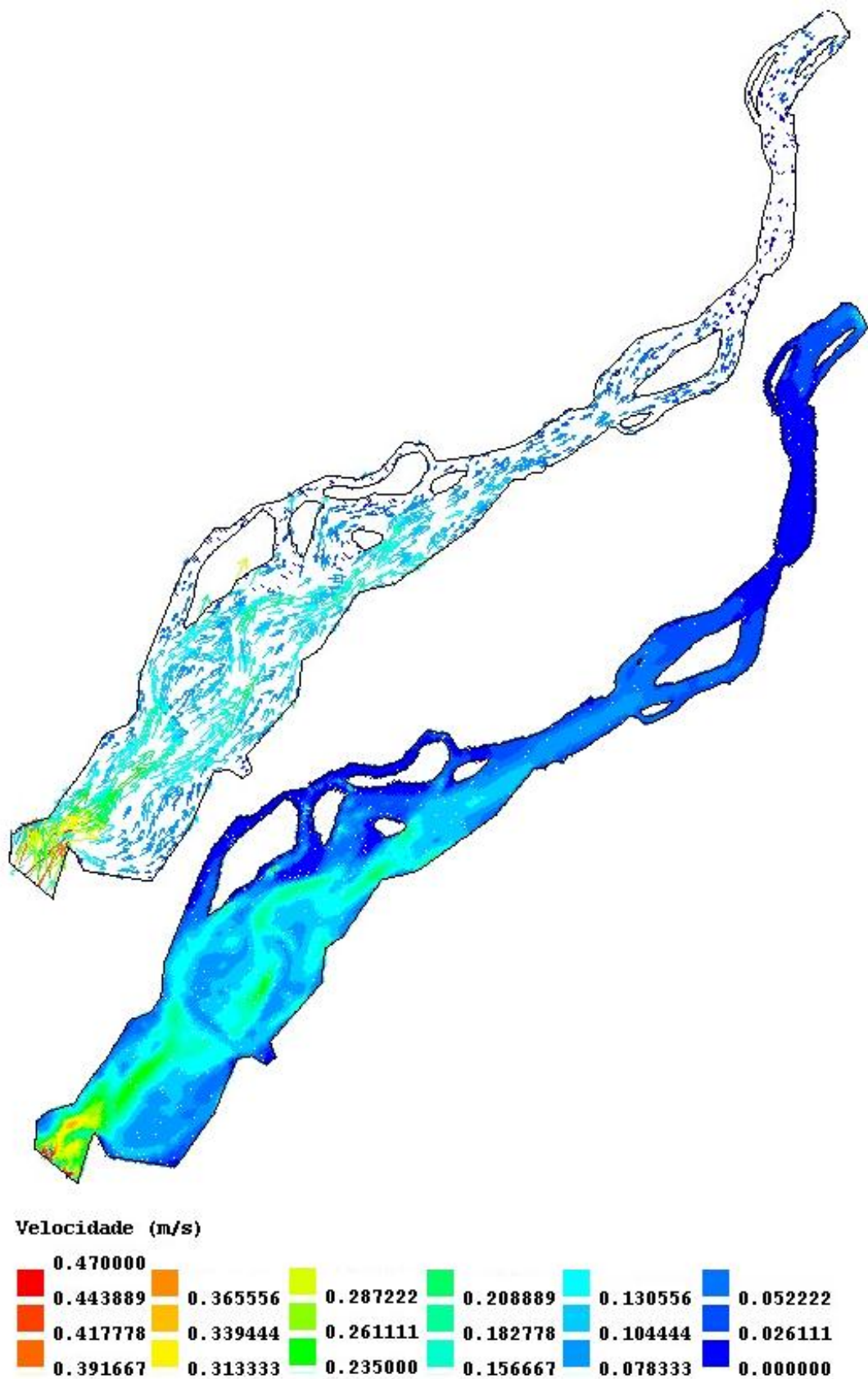
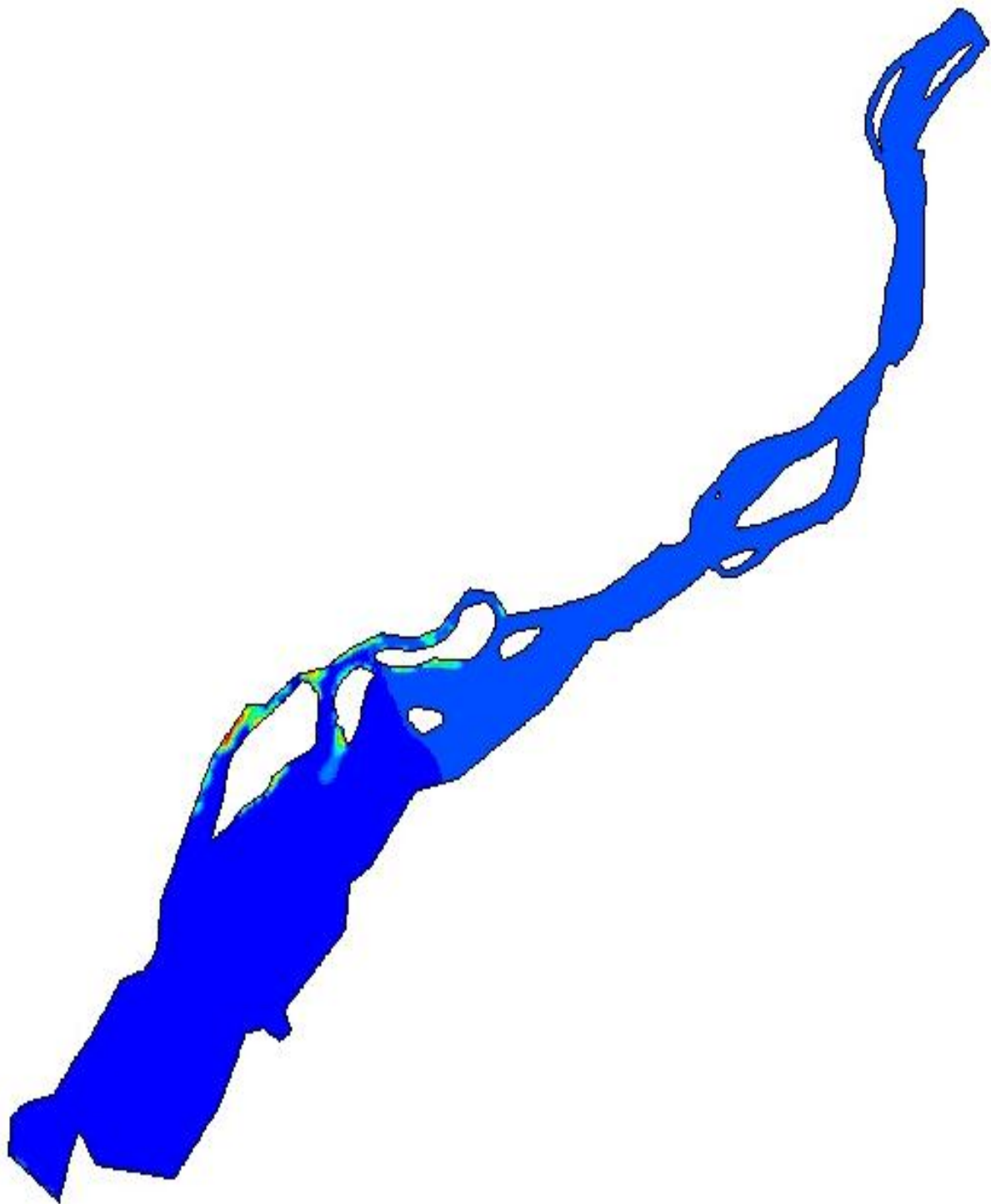


Fig.67 – Campo de velocidades na enchente – 51600 segundos.



Superfície livre (m)

4.445850						
4.340280	4.023568	3.706856	3.390144	3.073433	2.756721	
4.234709	3.917997	3.601285	3.284574	2.967862	2.651150	
4.129138	3.812427	3.495715	3.179003	2.862292	2.545580	

Fig.68– Superfície livre no final da enchente – 524400 segundos.

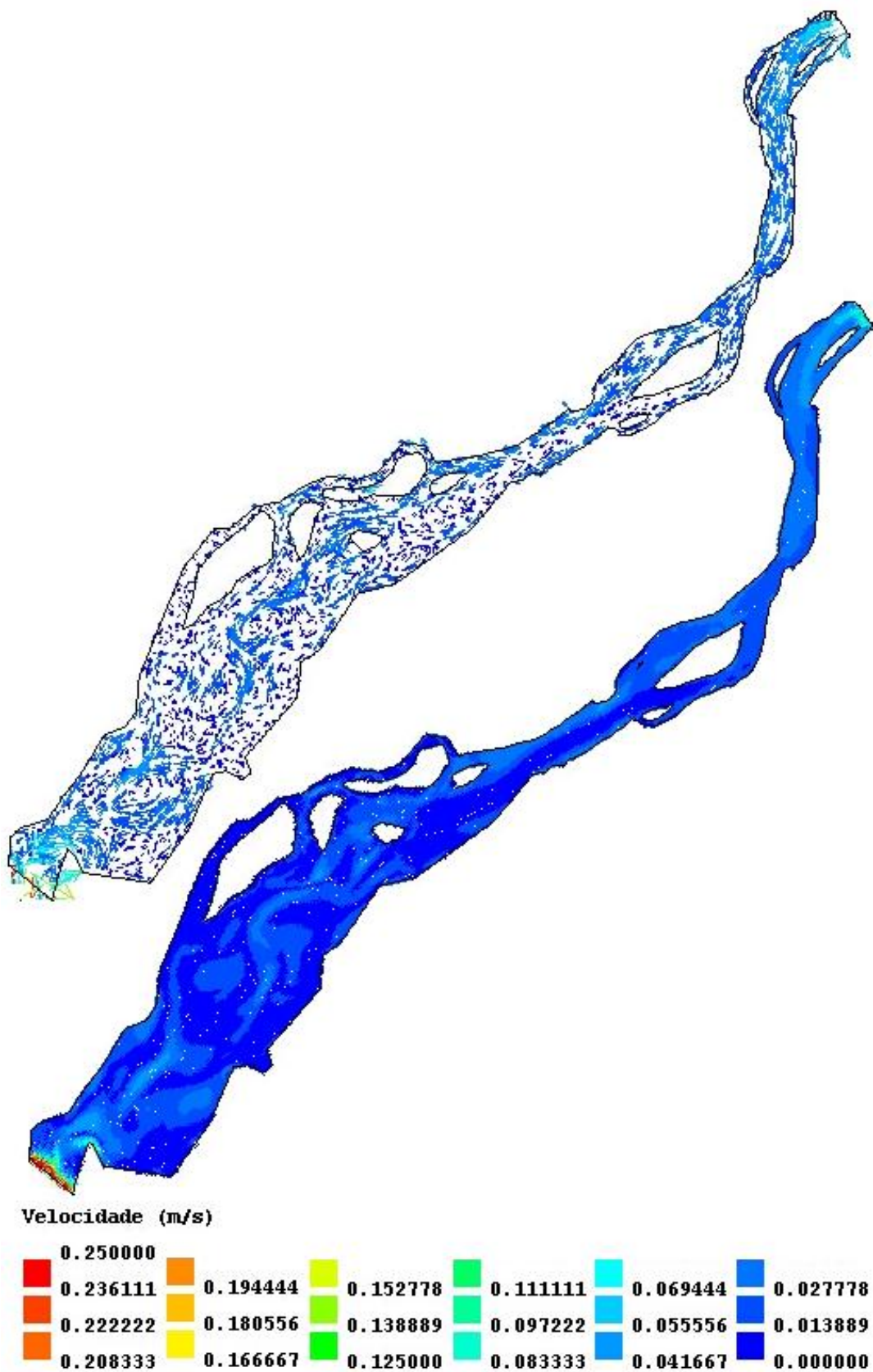
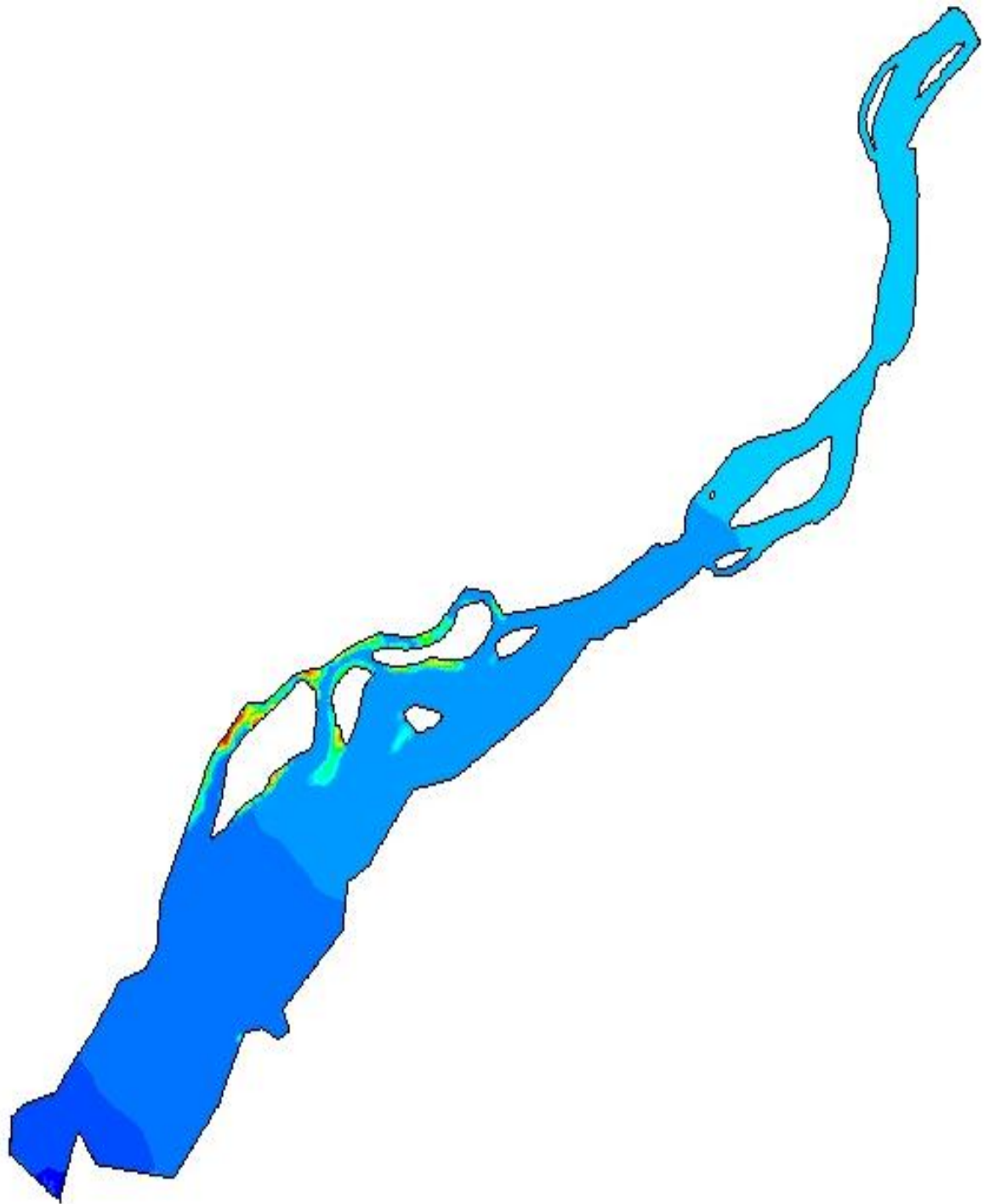


Fig.69 – Campos de velocidades no final da enchente – 524400 segundos.



Superfície livre (m)

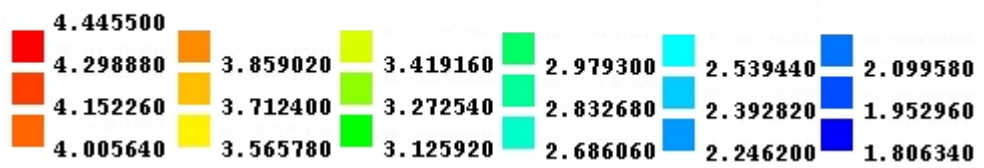


Fig.70 – Superfície livre na vazante – 536400 segundos.

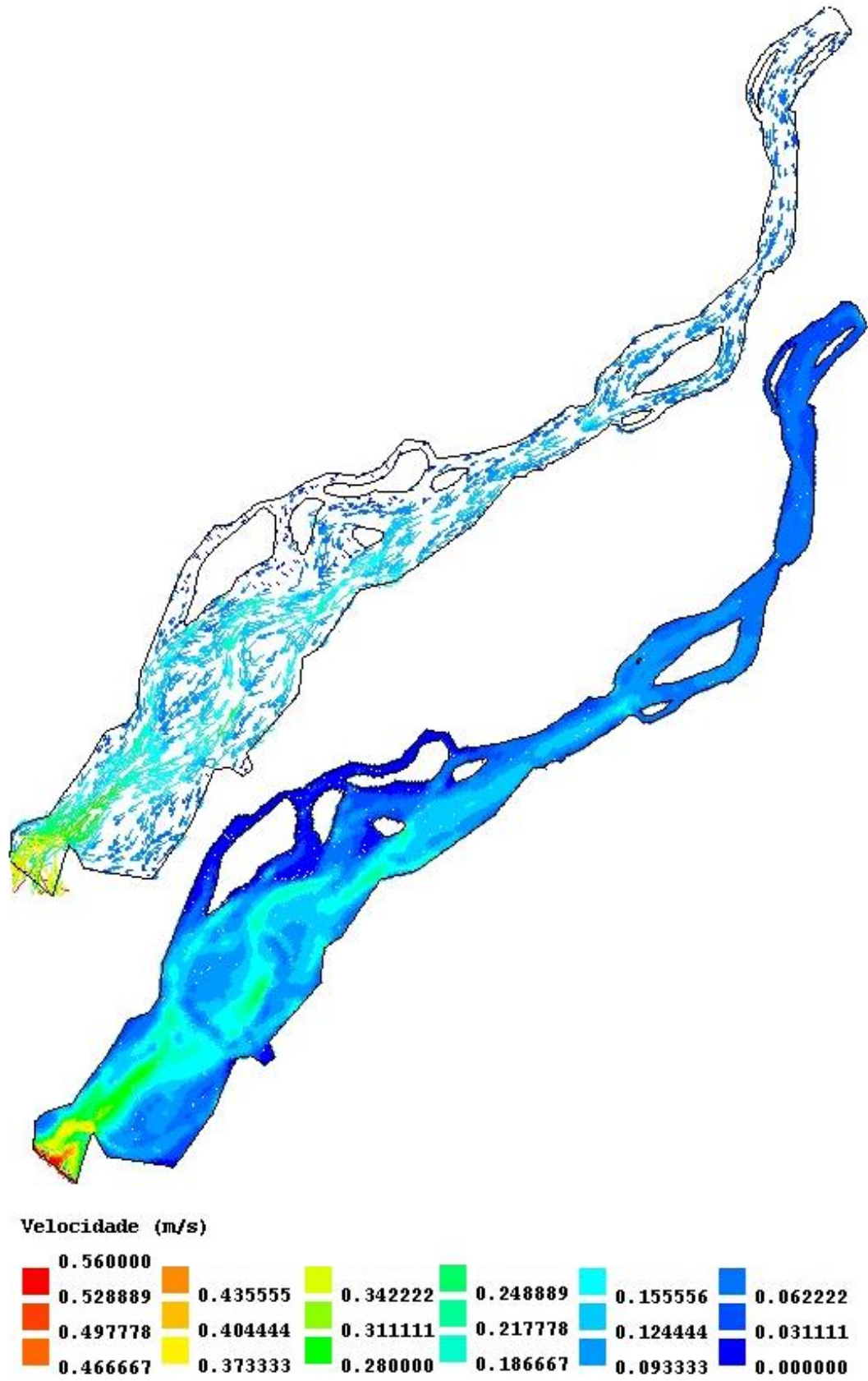


Fig.71 – Campos de velocidades na vazante – 536400 segundos.

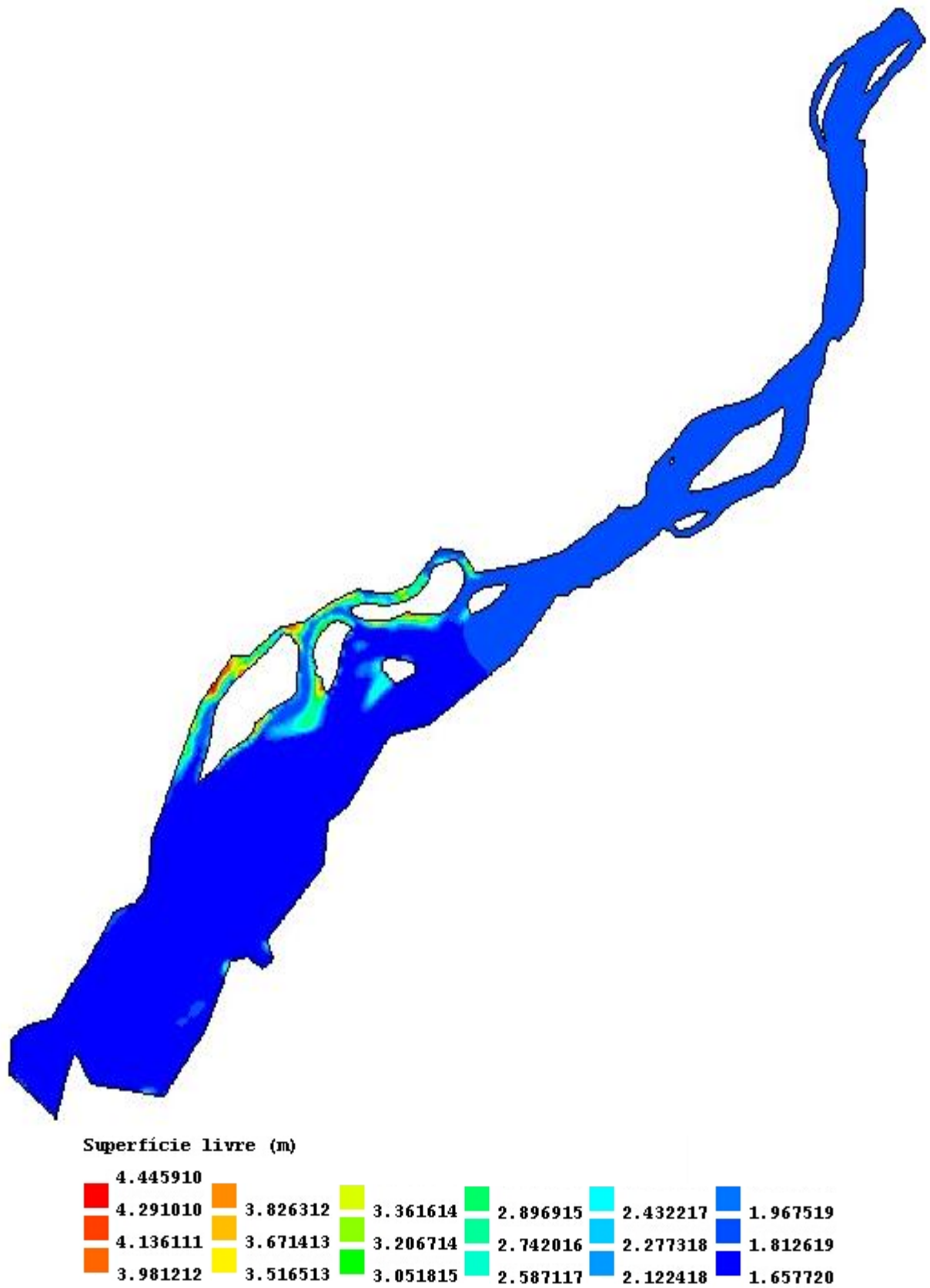


Fig.72 – Superfície livre no final da vazante – 549360 segundos.

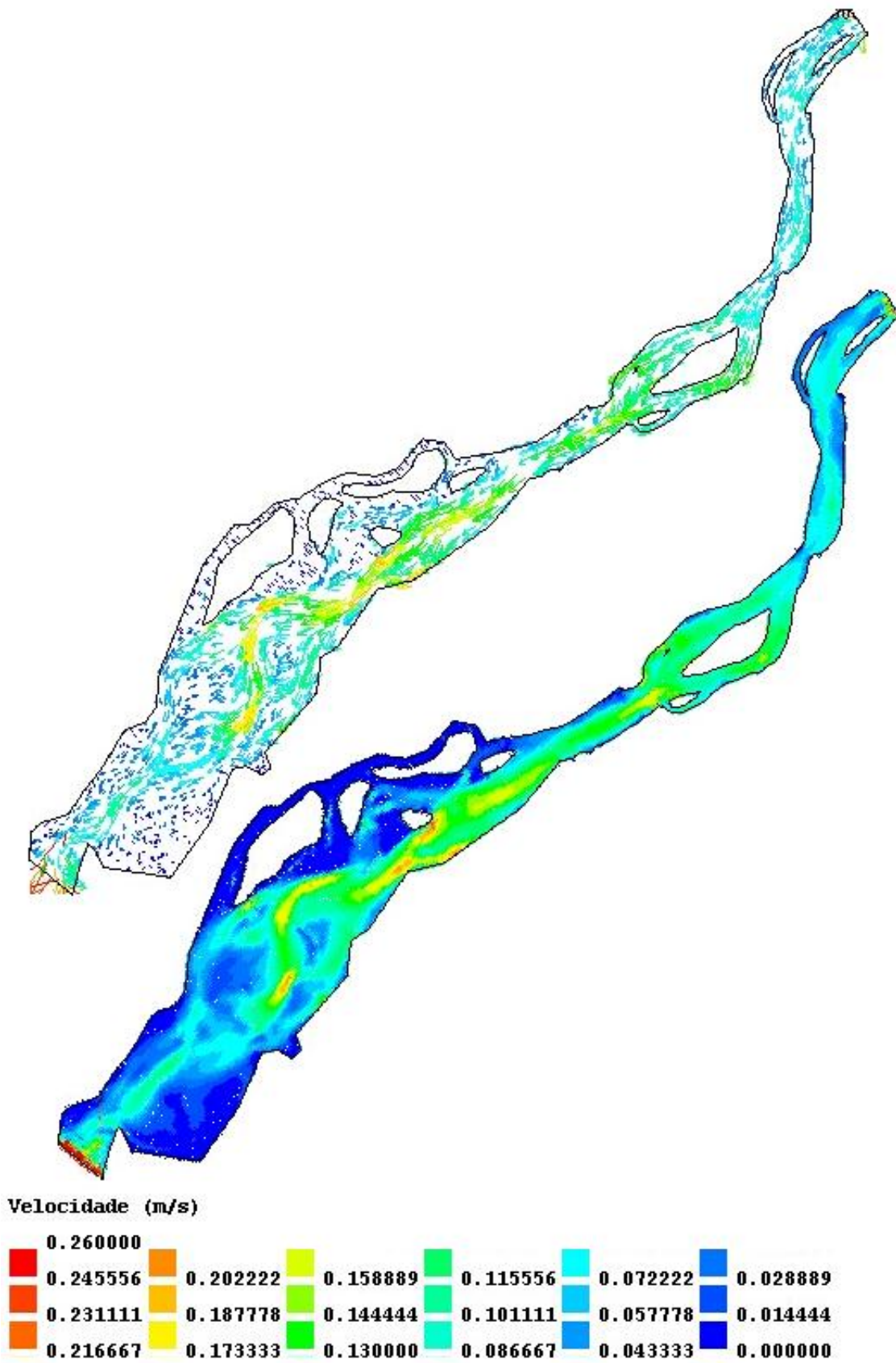


Fig.73 – Campos de velocidades no final da vazante – 549360 segundos.

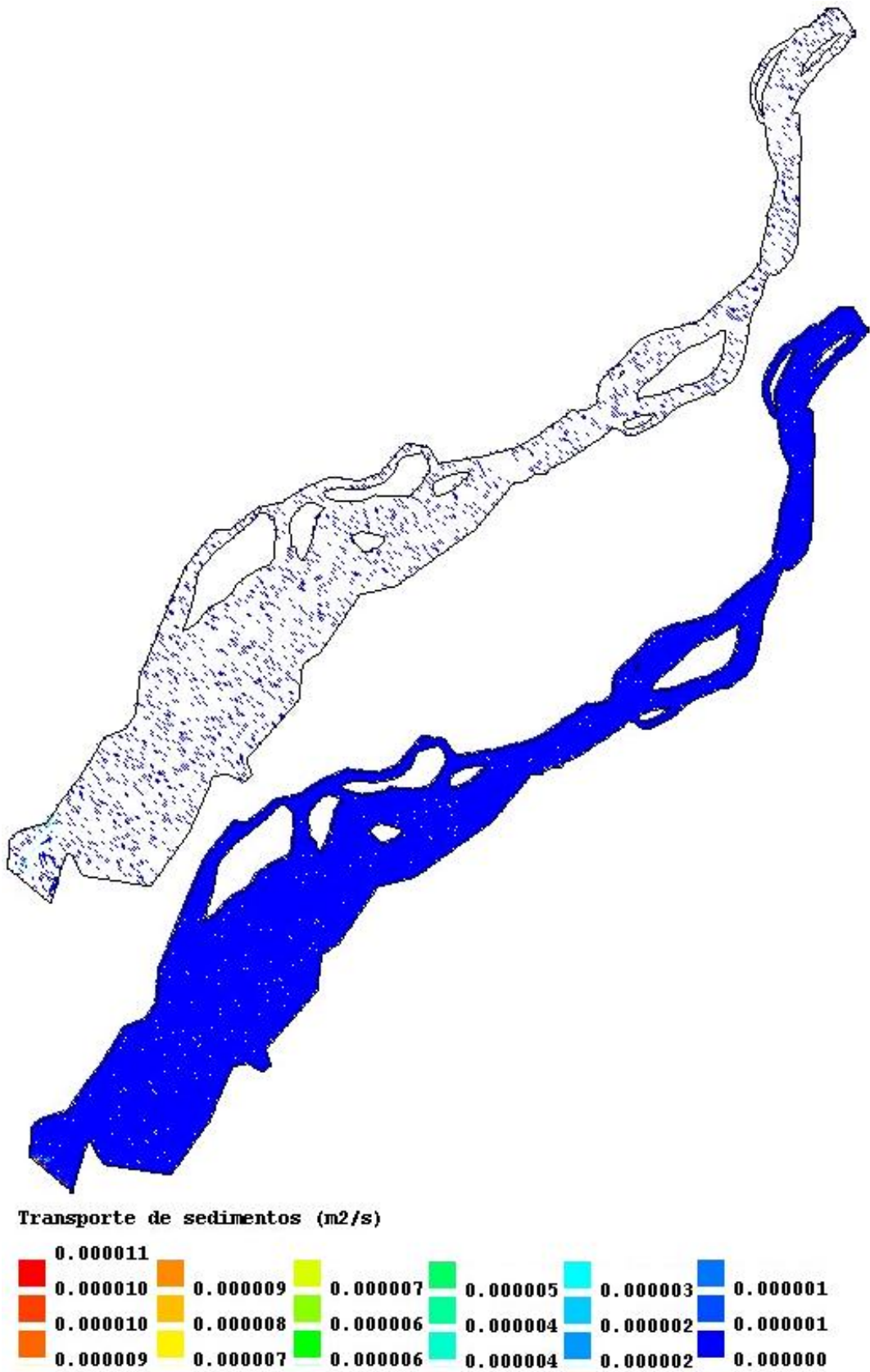


Fig.74 – Transporte de sedimentos na enchente – 515760 segundos.

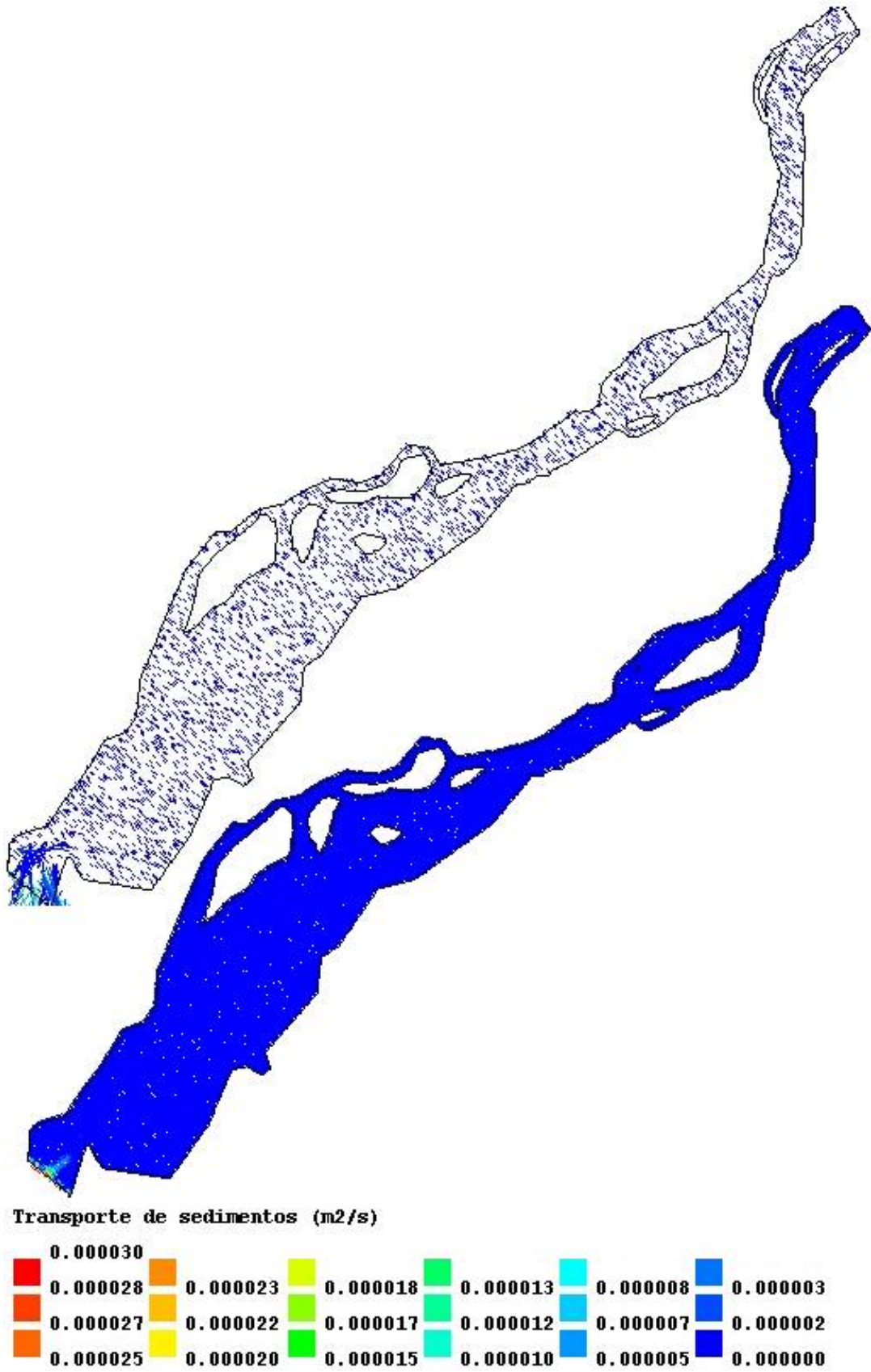


Fig.75 – Transporte de sedimentos na vazante – 536160 segundos.

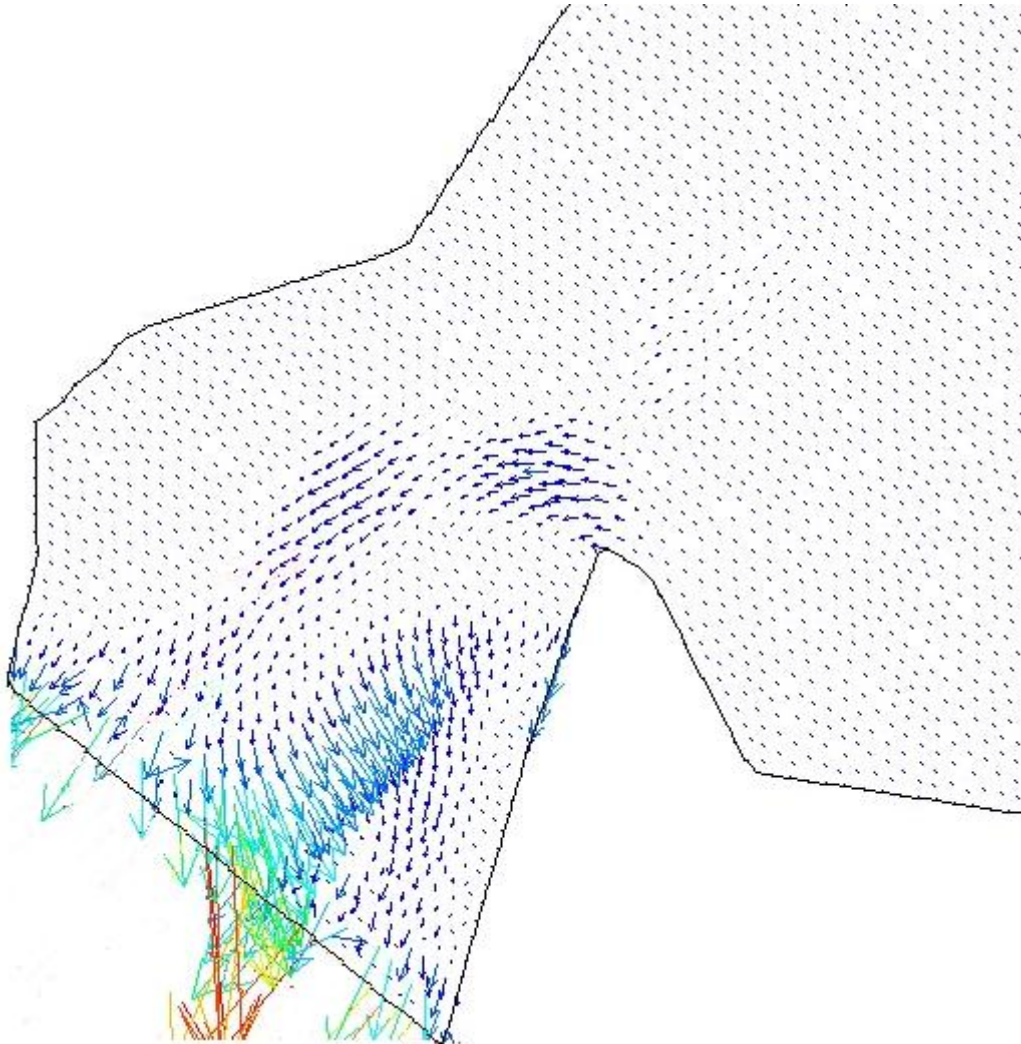


Fig.76 – Pormenor do transporte de sedimentos na embocadura durante a vazante - 536160 segundos.

CAUDAL MÁXIMO EM MARÉ VIVA – JANEIRO DE 2007

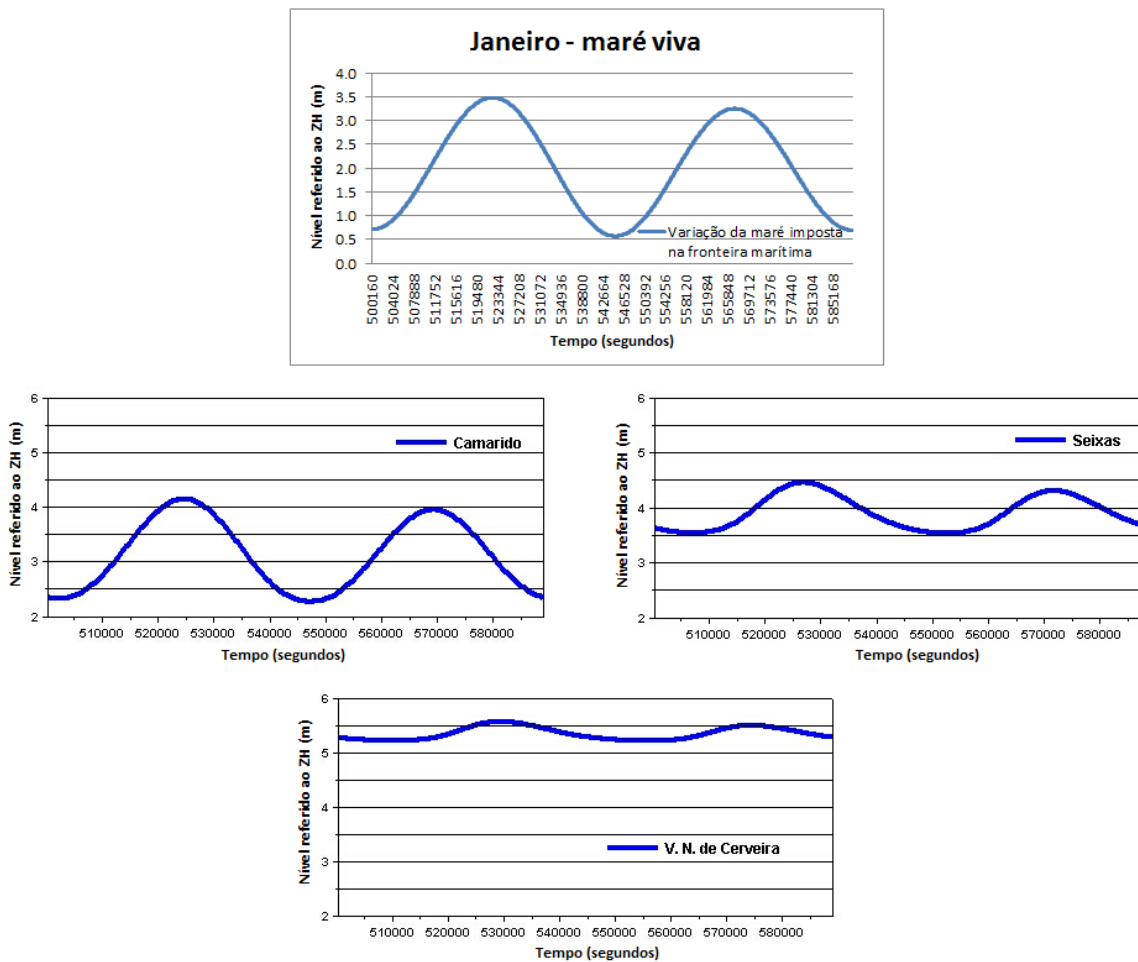


Fig.77 – Propagação da maré viva em Janeiro de 2007: a) imposta na fronteira marítima; b) Camarido; c) Seixas; d) V. N. de Cerveira.

Tabela 7 – Instantes em que foram apresentados resultados para a superfície livre, campo de velocidades e transporte de sedimentos.

<b>Caudal = 2500,00 m³/s</b>	Instante (segundos)
<b>Superfície livre/Campos de velocidades</b>	
enchente	518640
vazante	544800
<b>Transporte de sedimentos</b>	
enchente	518640
vazante	541920

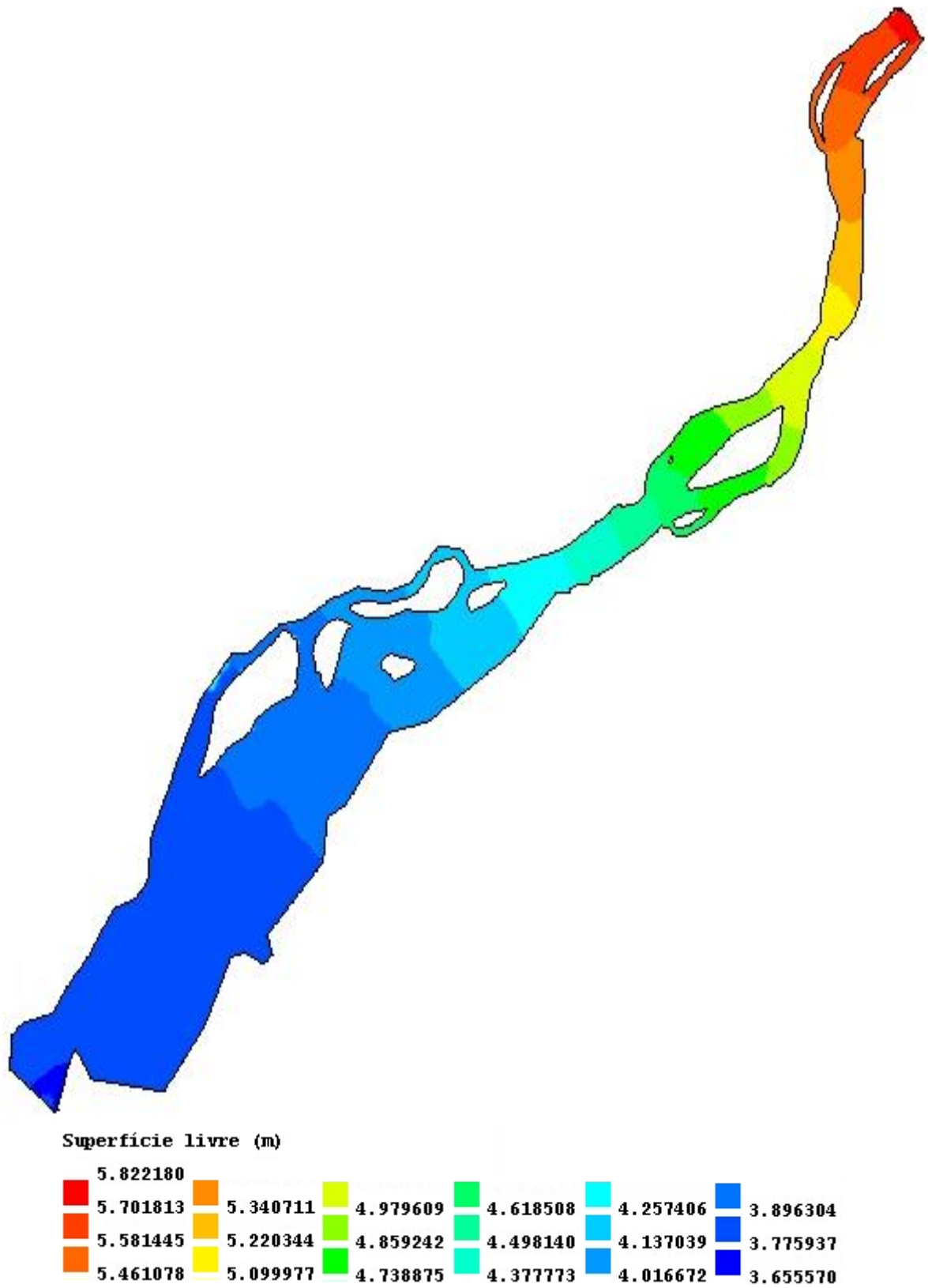


Fig.78 – Superfície livre na enchente – 518640 segundos.

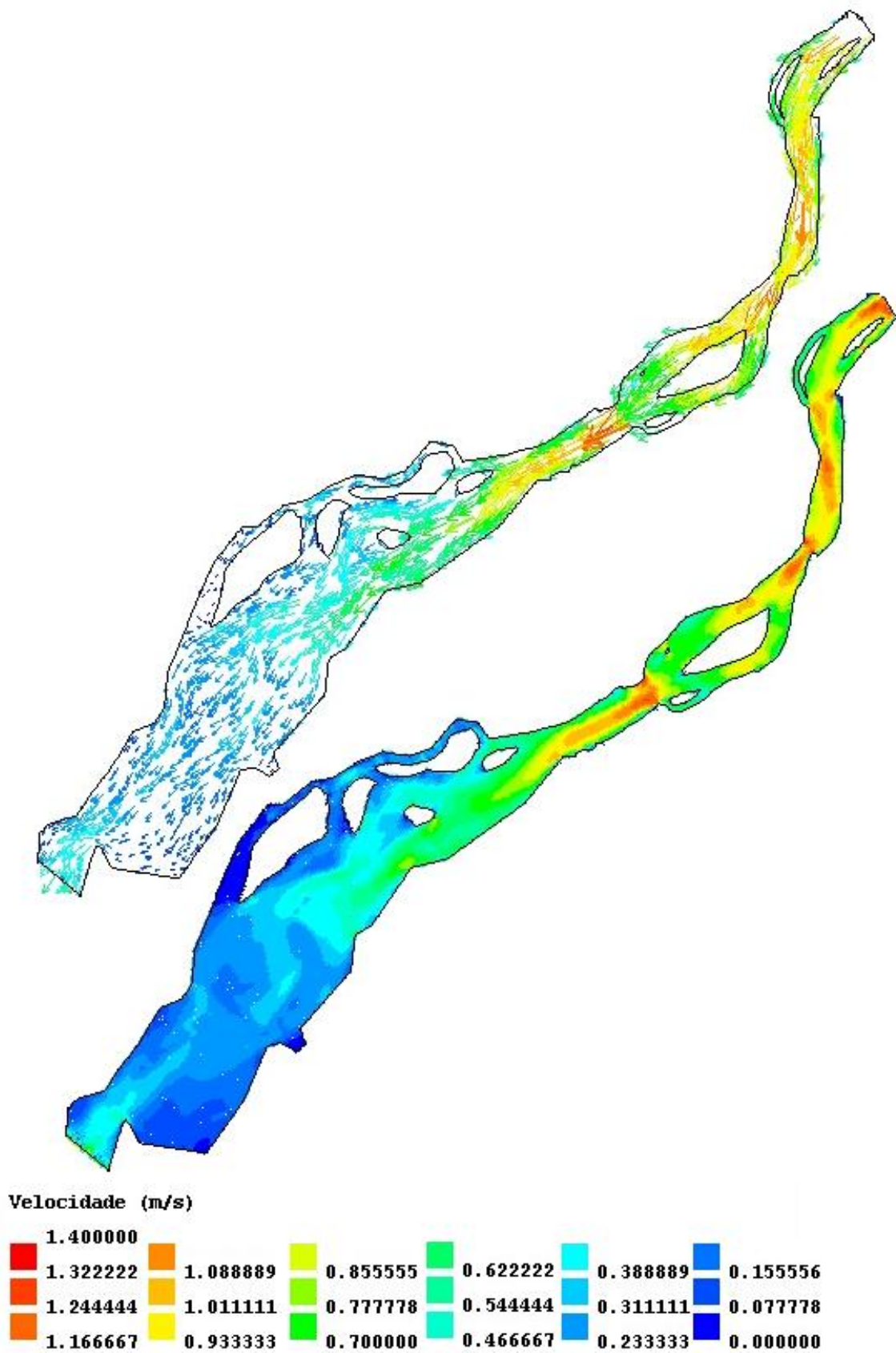
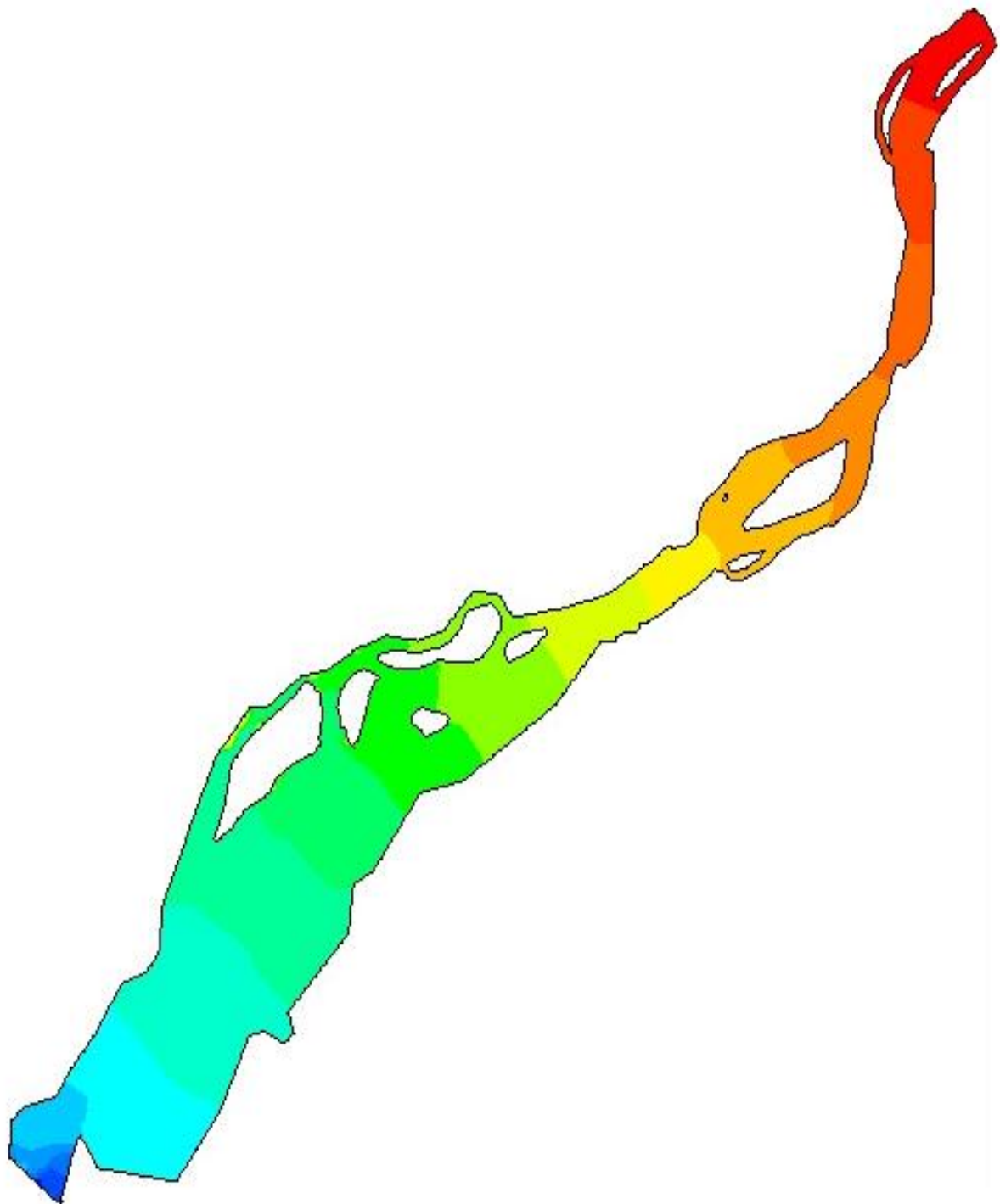


Fig.79 – Campo de velocidades na enchente – 518640 segundos.



**Superfície livre (m)**

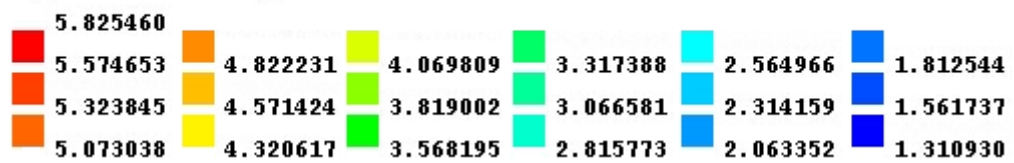


Fig.80 – Superfície livre na vazante – 544800 segundos.

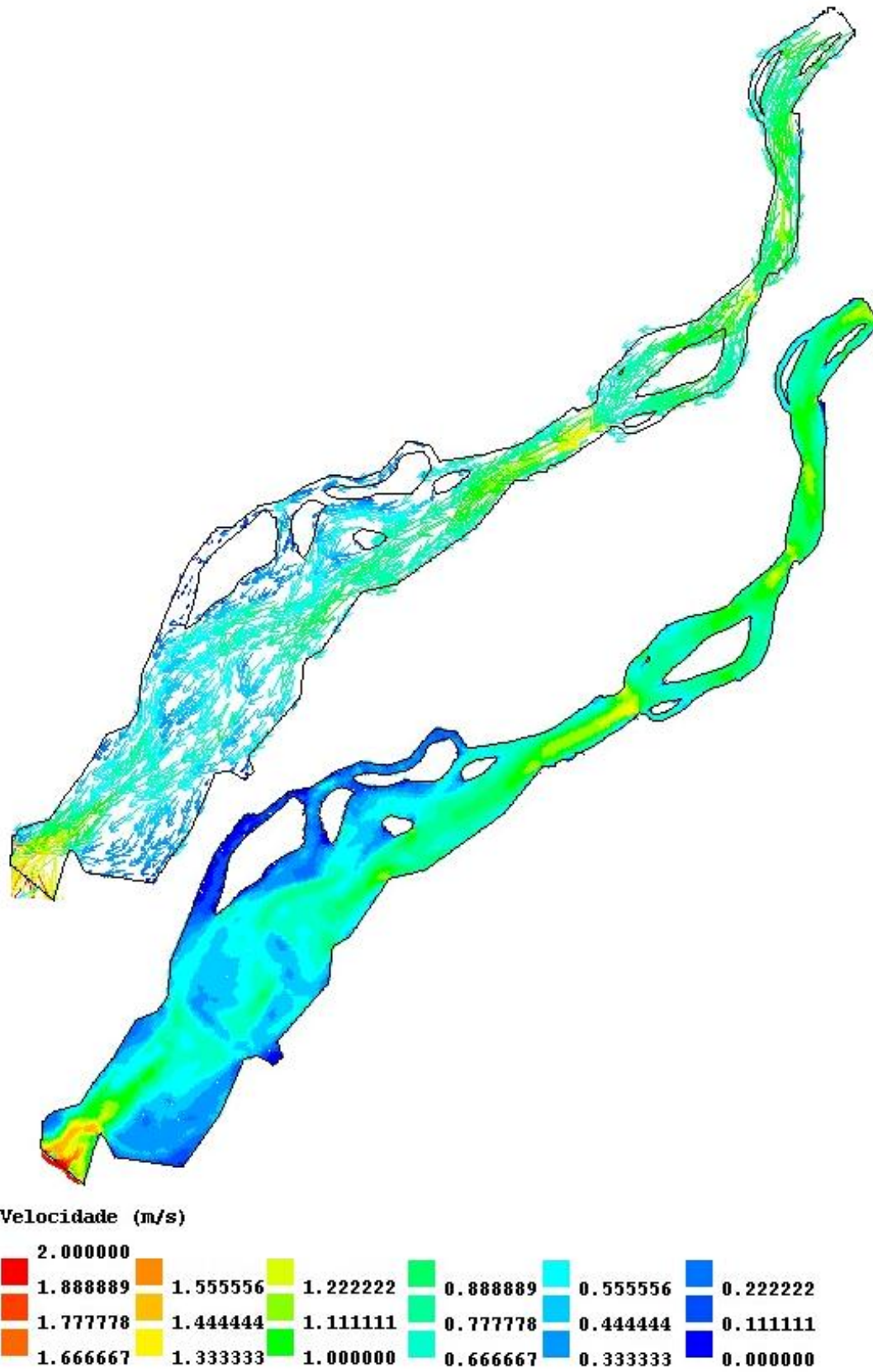


Fig.81 – Campos de velocidades na vazante – 544800 segundos.

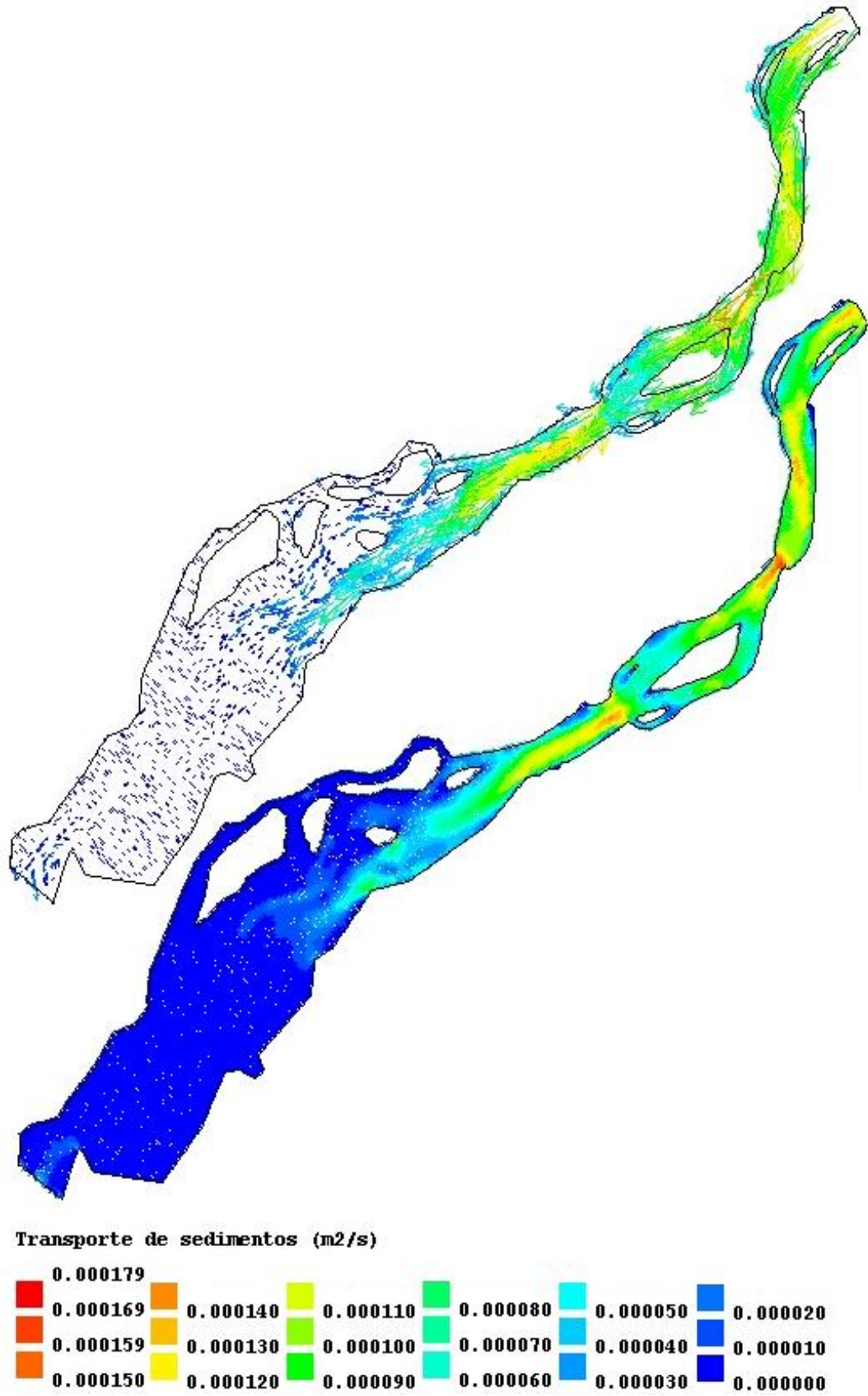


Fig.82 – Transporte de sedimentos na enchente – 524400 segundos.

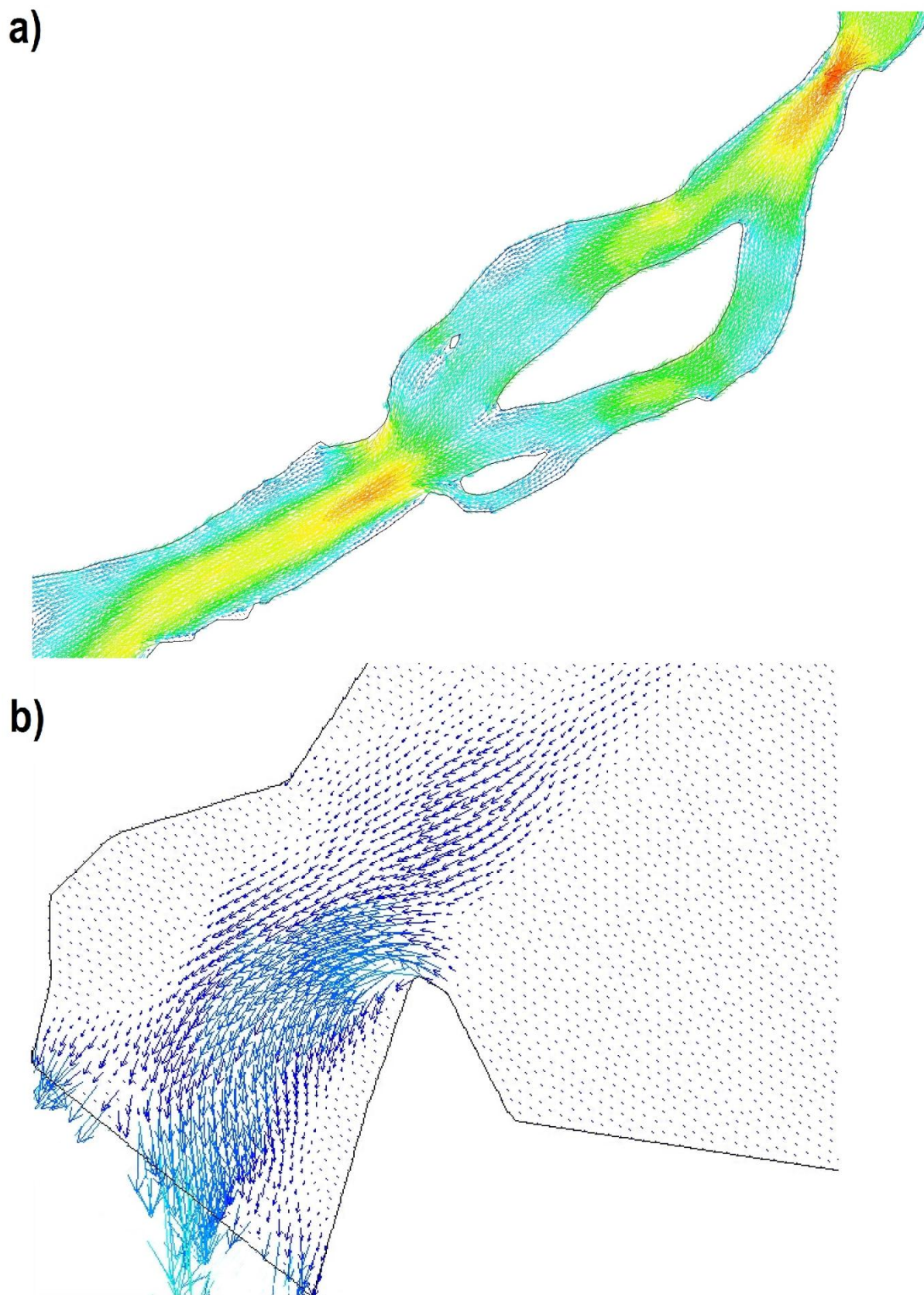


Fig.83 – Pormenor do transporte de sedimentos durante a enchente na: a) ilha da Boega; b) embocadura do estuário - 524400 segundos.

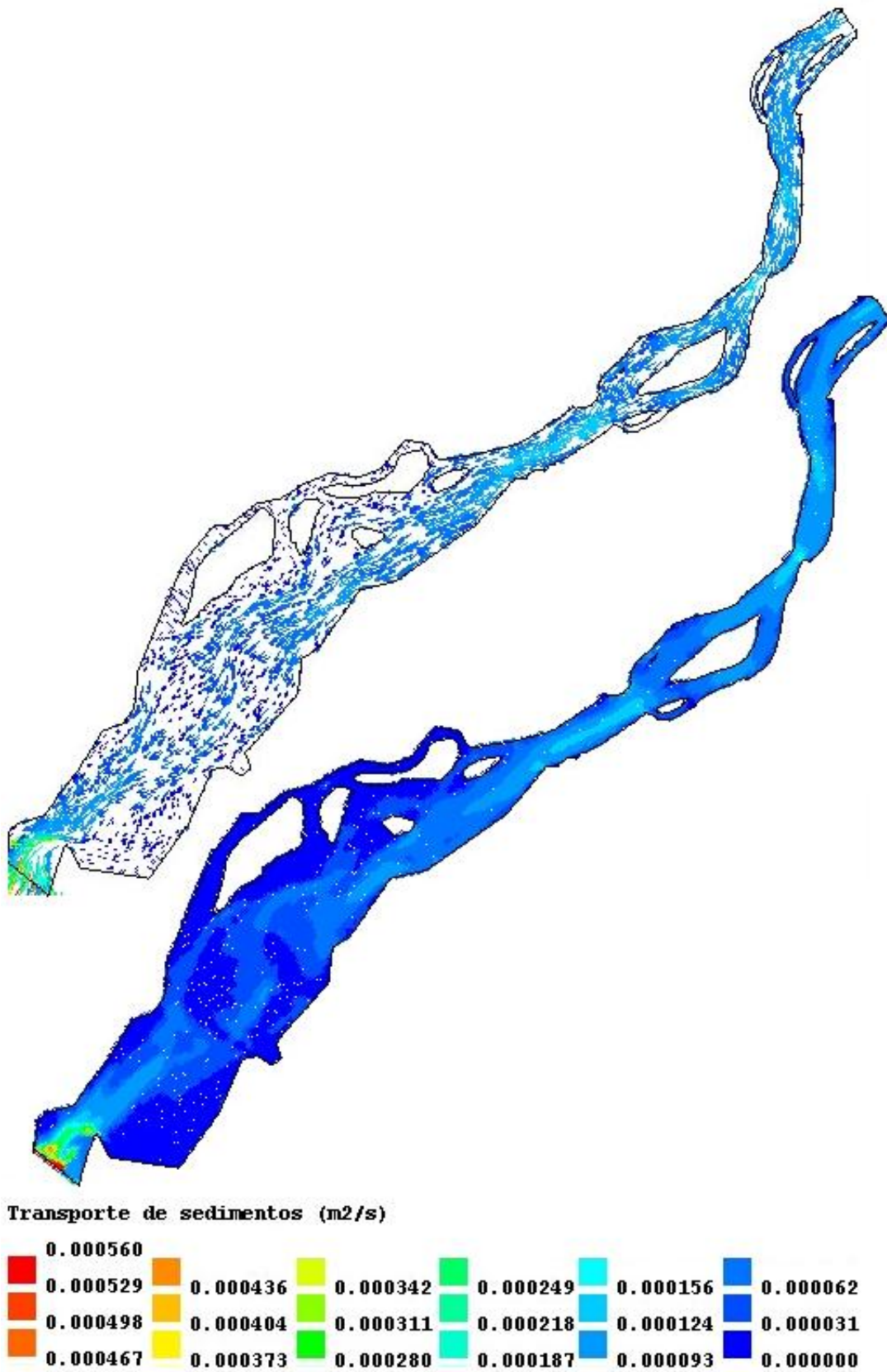


Fig.84 – Transporte de sedimentos na vazante – 541920 segundos.

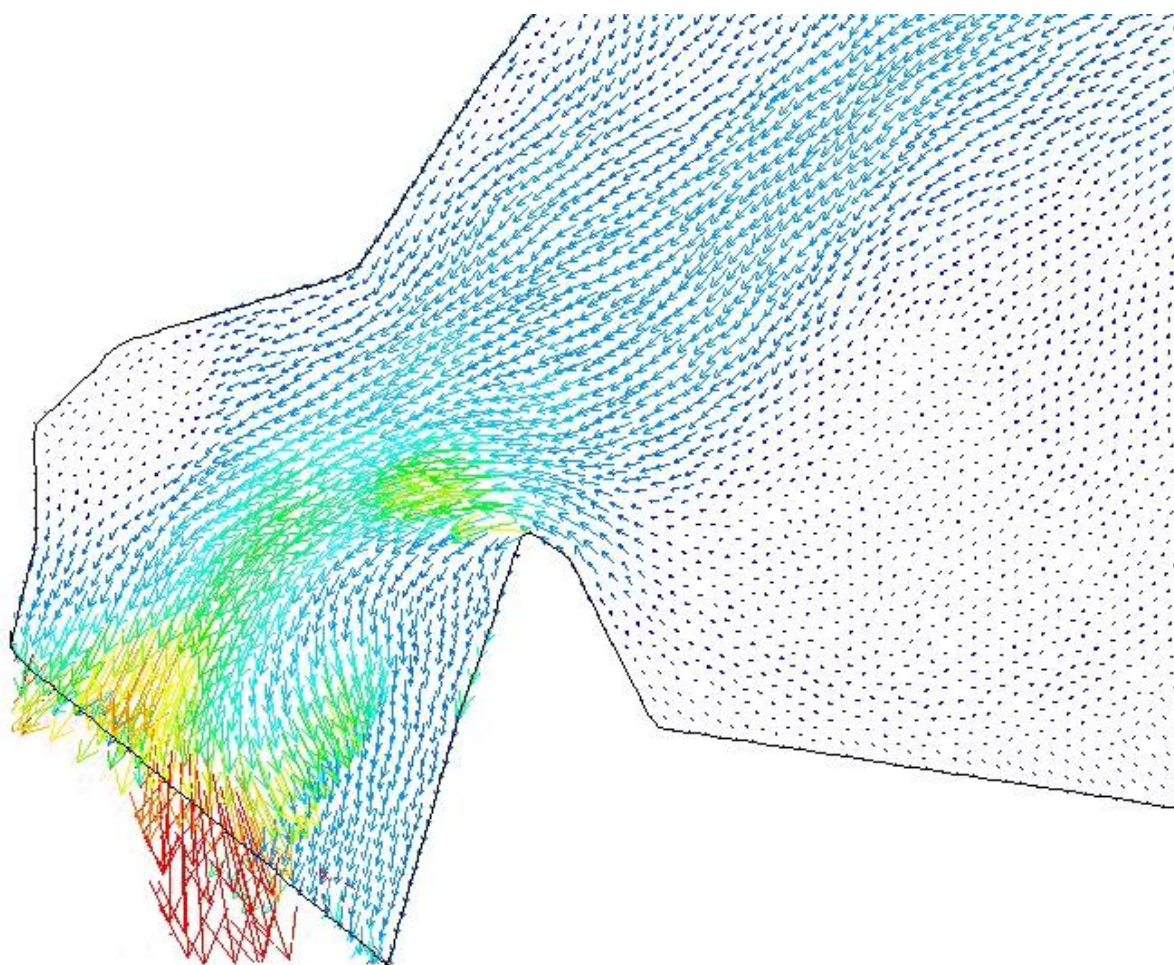


Fig.85 – Pormenor do transporte de sedimentos na embocadura durante a vazante – 541920 segundos.

4.8.2 CAUDAL MÁXIMO EM MARÉ MORTA – JANEIRO DE 2007

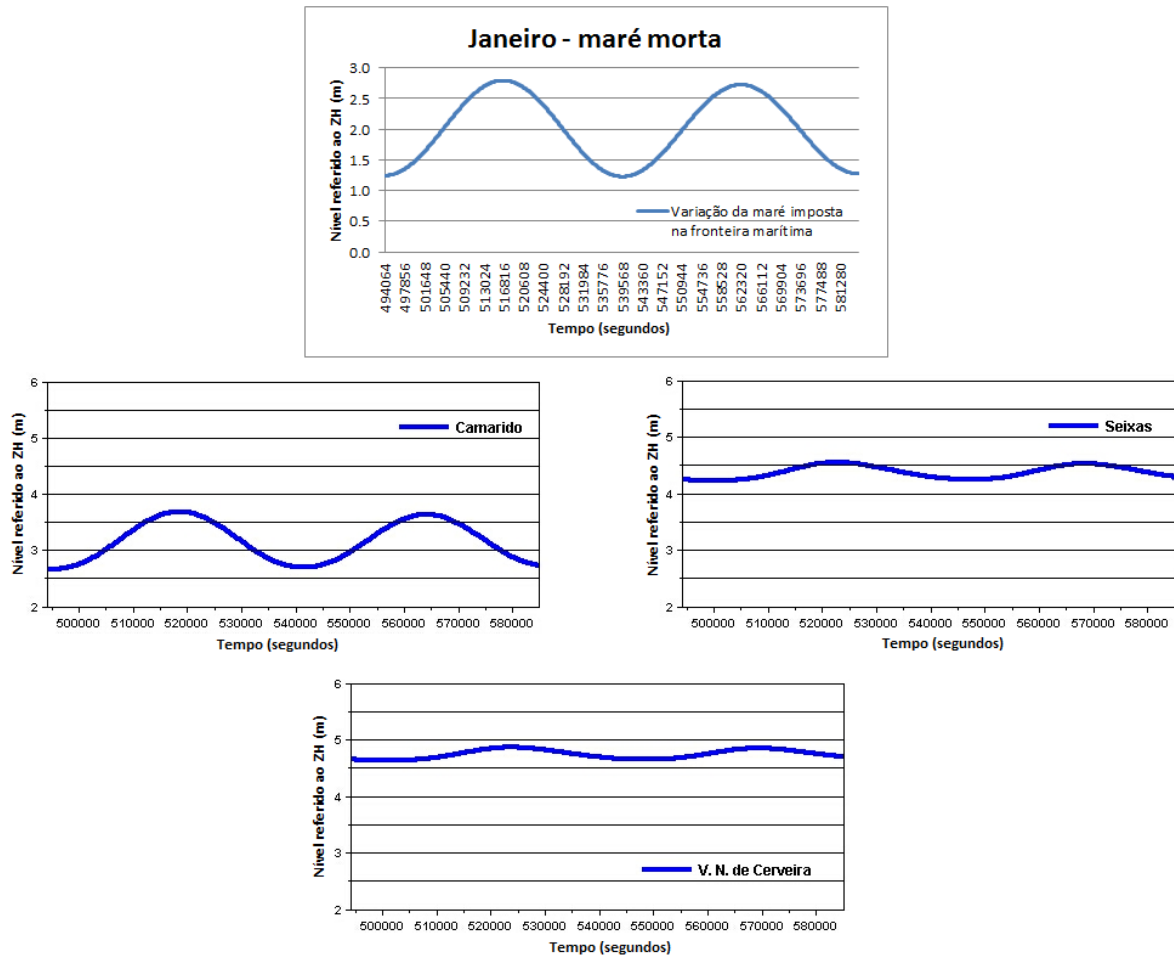
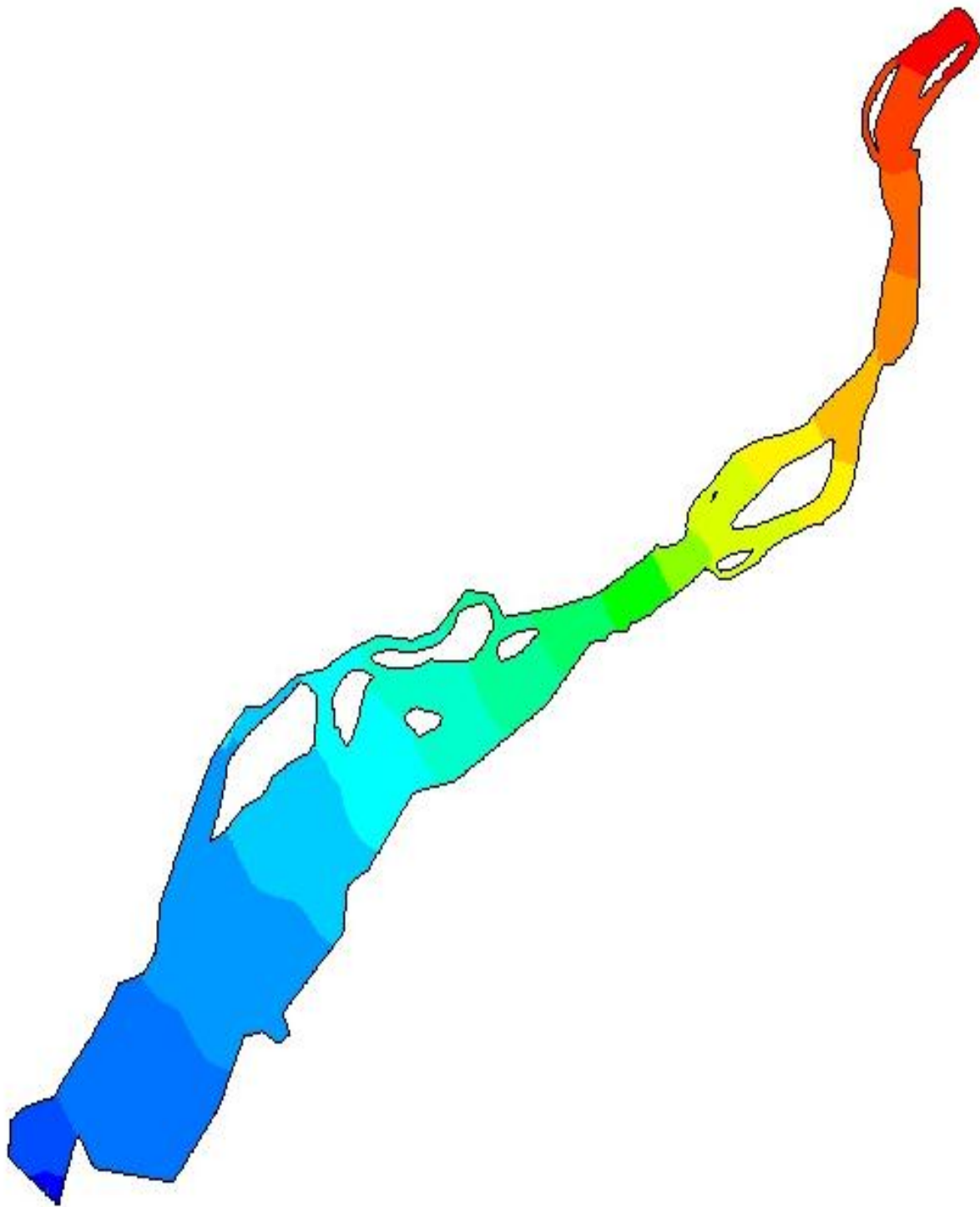


Fig.86 – Propagação da maré morta em Janeiro de 2007: a) imposta na fronteira marítima; b) Camarido; c) Seixas; d) V. N. de Cerveira.

Tabela 8 – Instantes em que foram apresentados resultados para a superfície livre, campo de velocidades e transporte de sedimentos.

<b>Caudal = 2500,00 m<sup>3</sup>/s</b>	Instante (segundos)
<b>Superfície livre/Campos de velocidades</b>	
enchente	510720
vazante	538800
<b>Transporte de sedimentos</b>	
enchente	512160
vazante	537120



Superfície livre (m)

7.052030					
6.829707	6.162737	5.495767	4.828797	4.161827	3.494857
6.607383	5.940413	5.273443	4.606473	3.939503	3.272533
6.385060	5.718090	5.051120	4.384150	3.717180	3.050210

Fig.87 – Superfície livre na enchente – 510720 segundos.

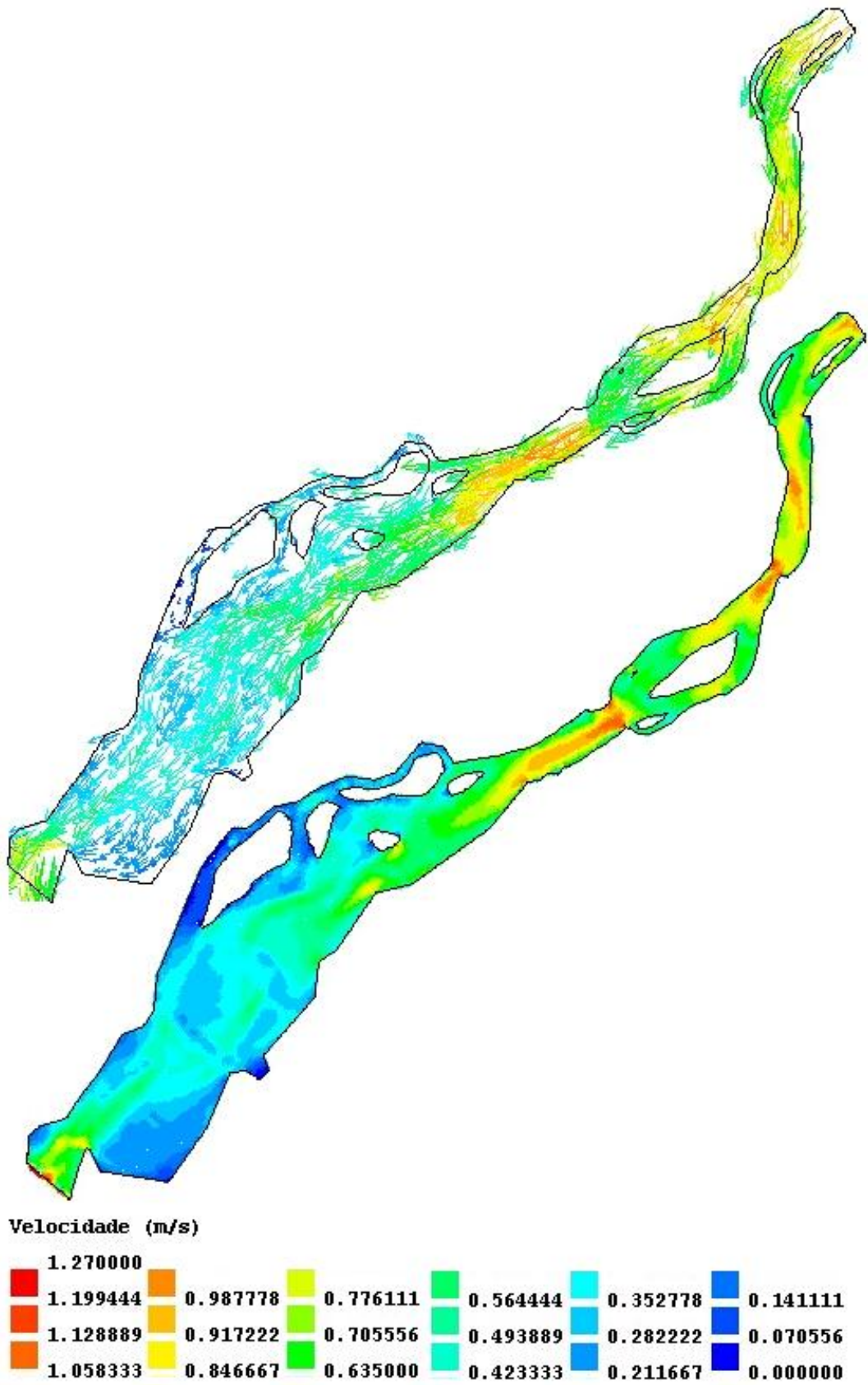


Fig.88 – Campos de velocidades na enchente – 510720 segundos.

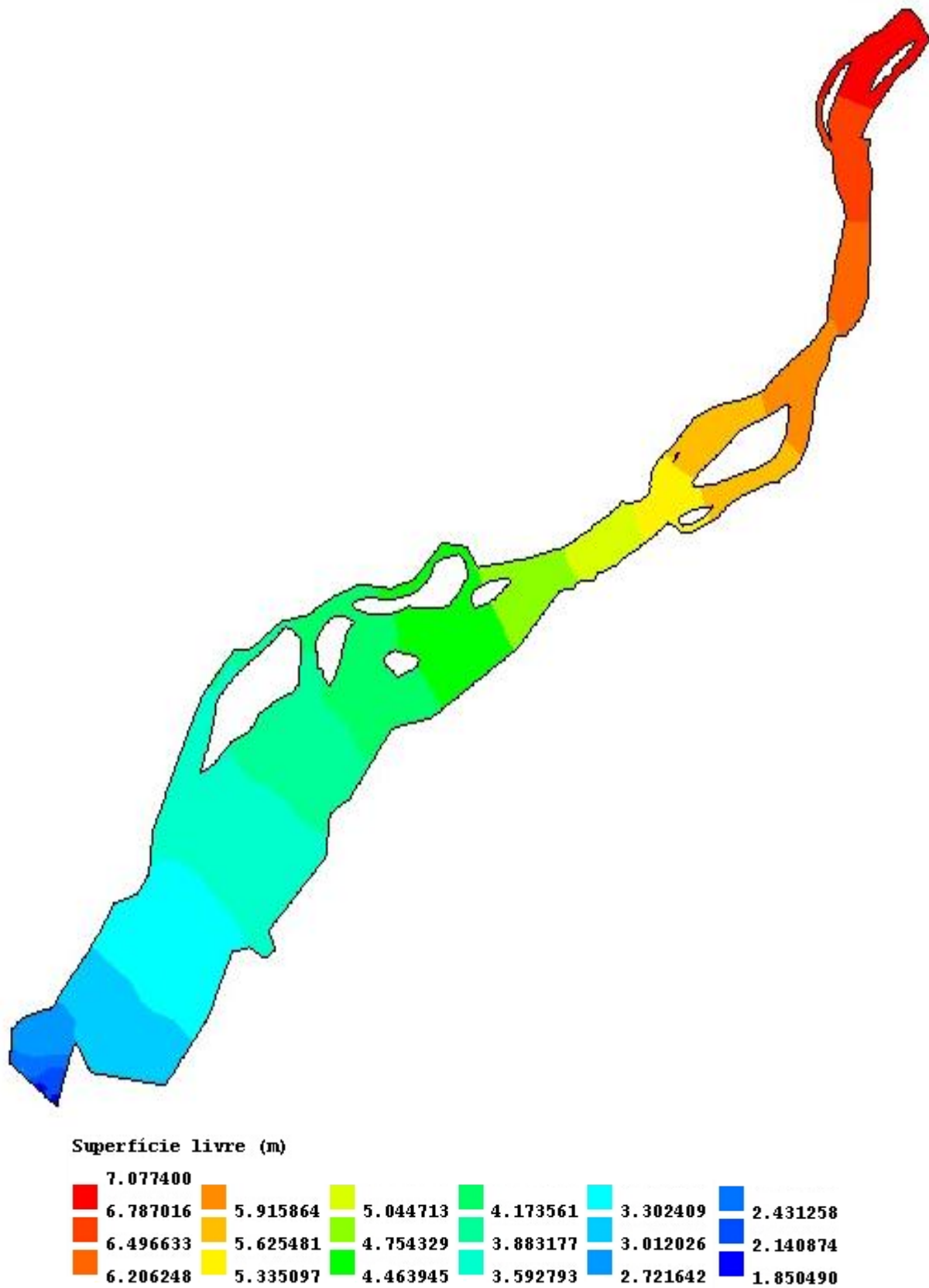


Fig.89 – Superfície livre na vazante – 538800 segundos.

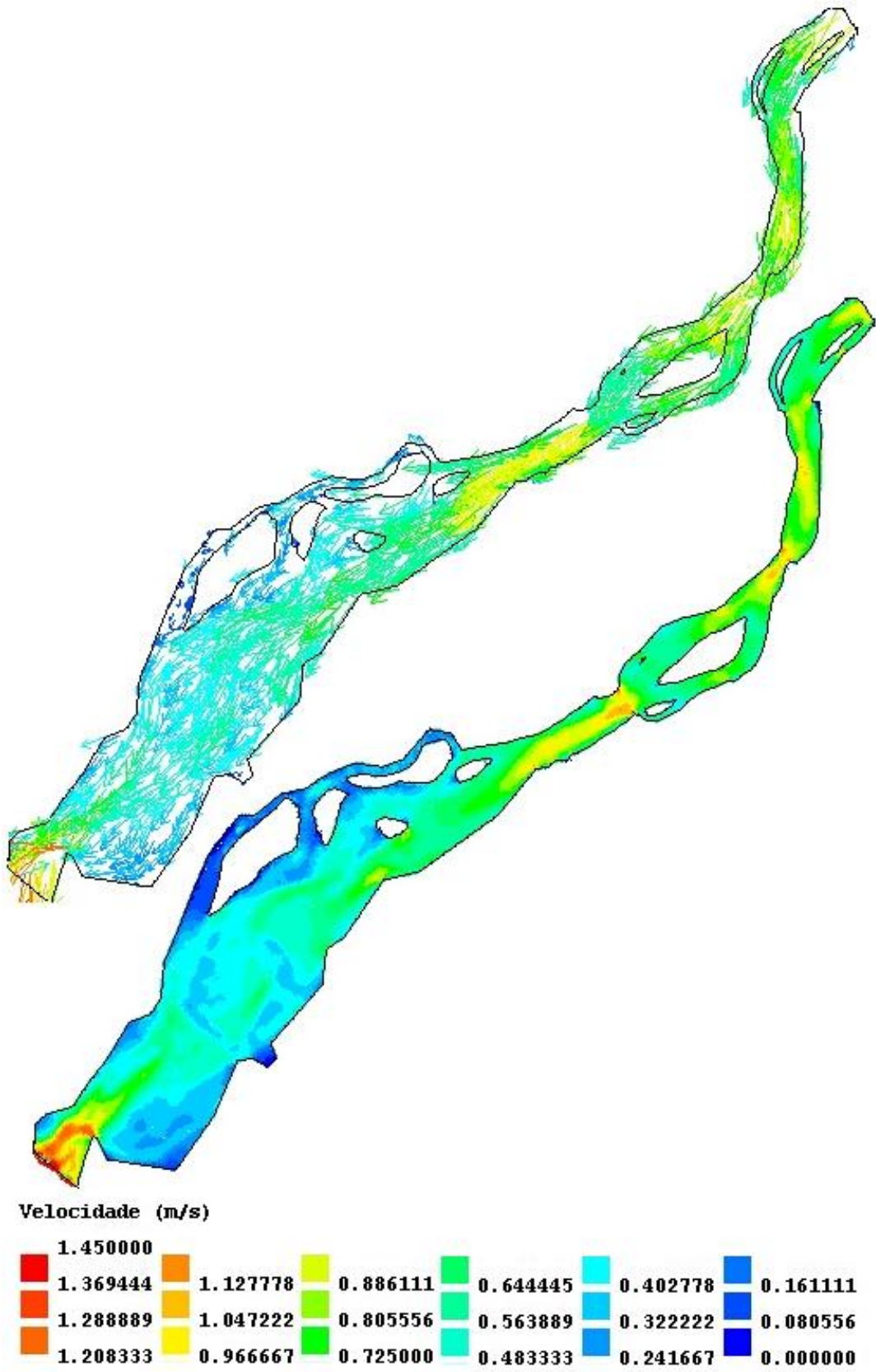


Fig.90 – Campos de velocidades na vazante – 538800 segundos.

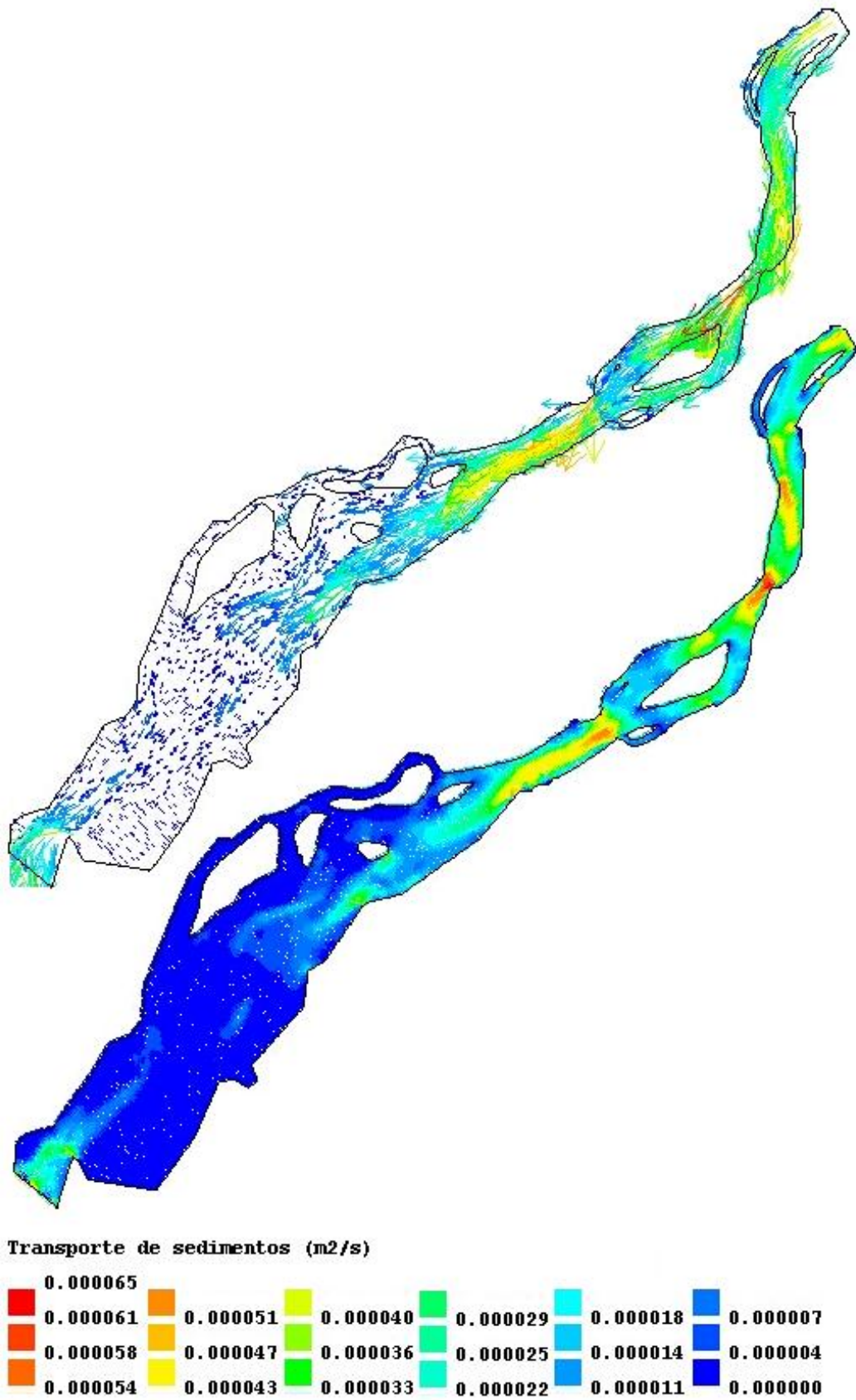


Fig.91 – Transporte de sedimentos na enchente – 512160 segundos.

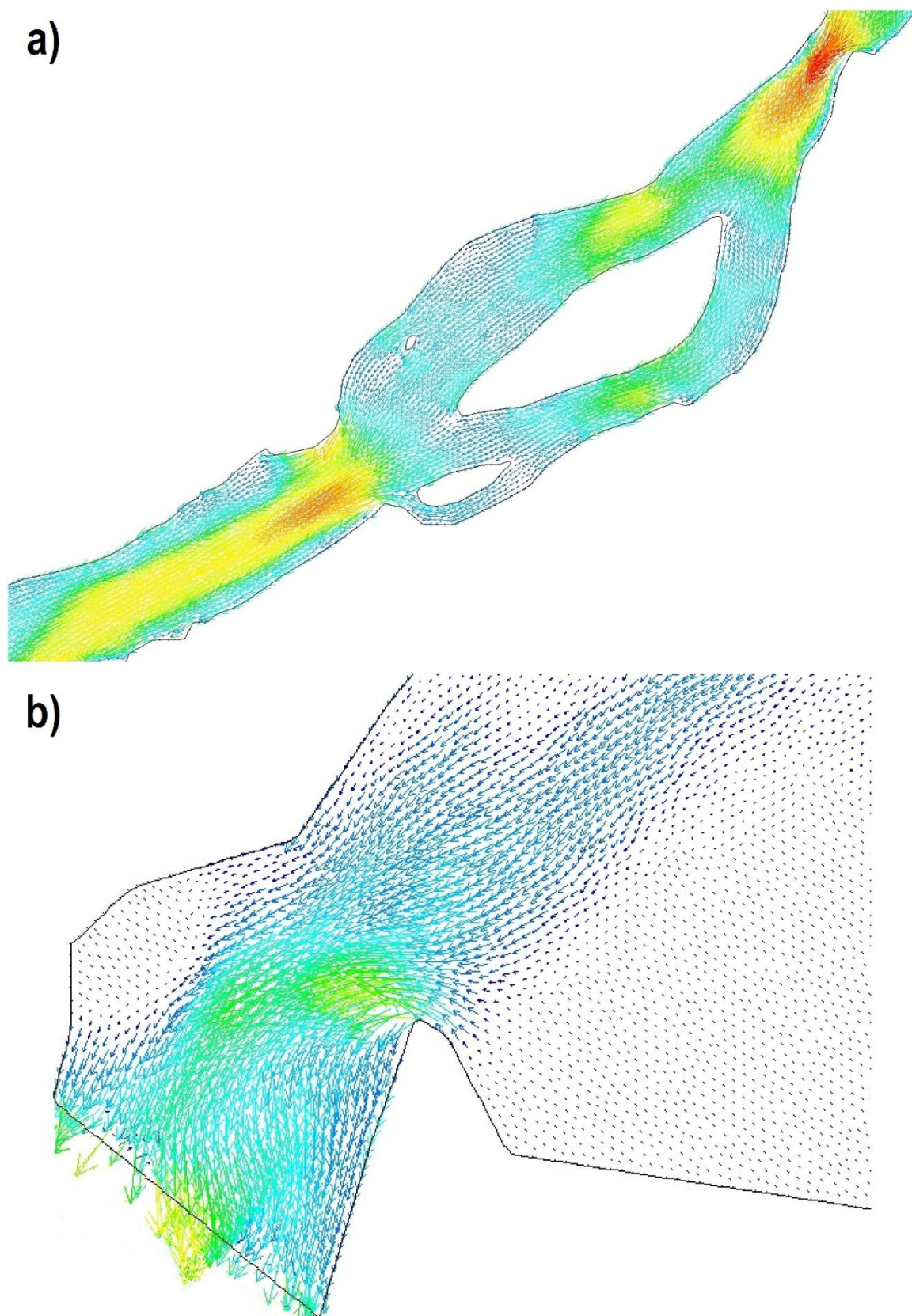


Fig.92 – Pormenor do transporte de sedimentos durante a enchente na: a) ilha da Boega; b) embocadura do estuário – 512160 segundos.

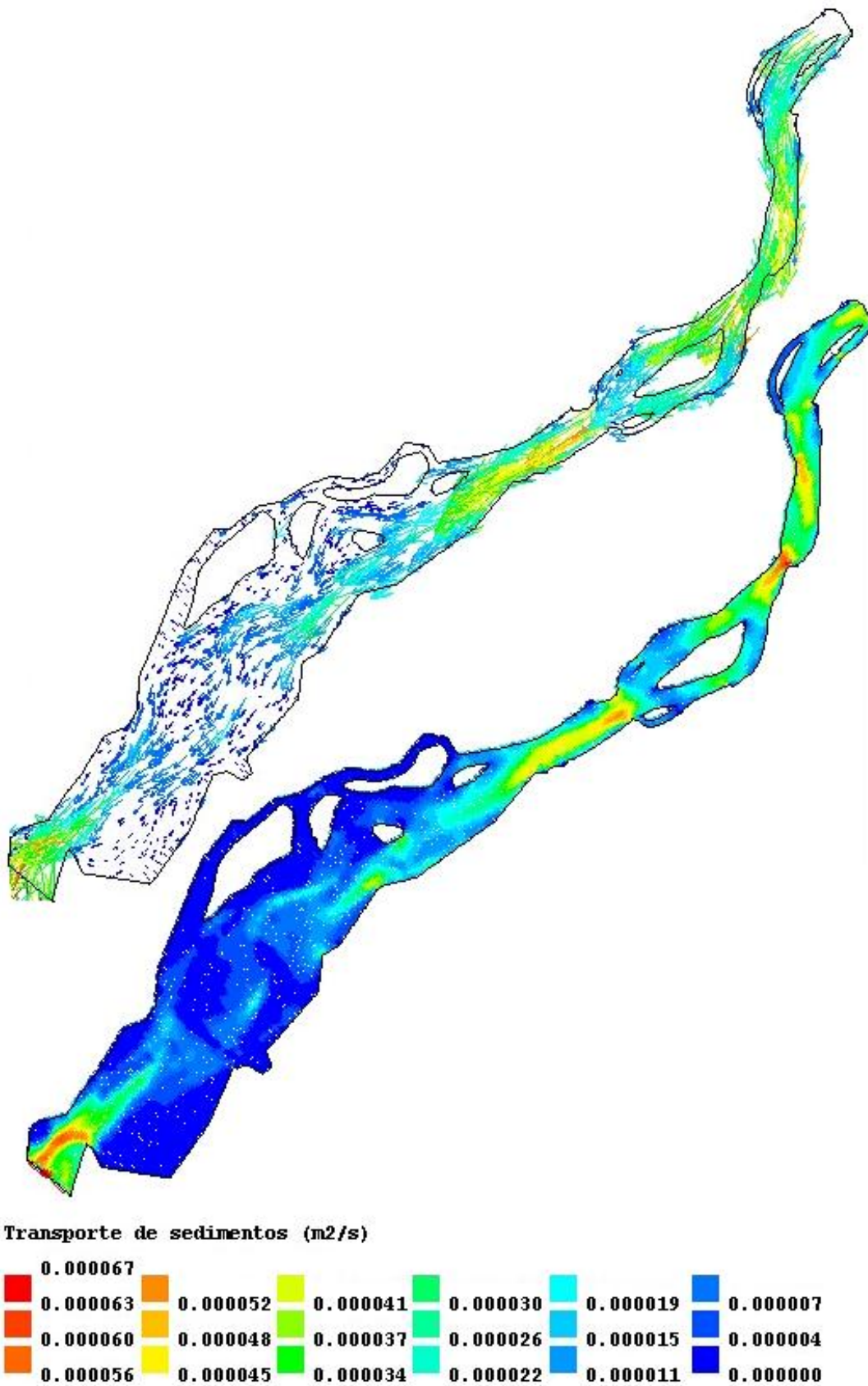


Fig.93 – Transporte de sedimentos na vazante – 537120 segundos.

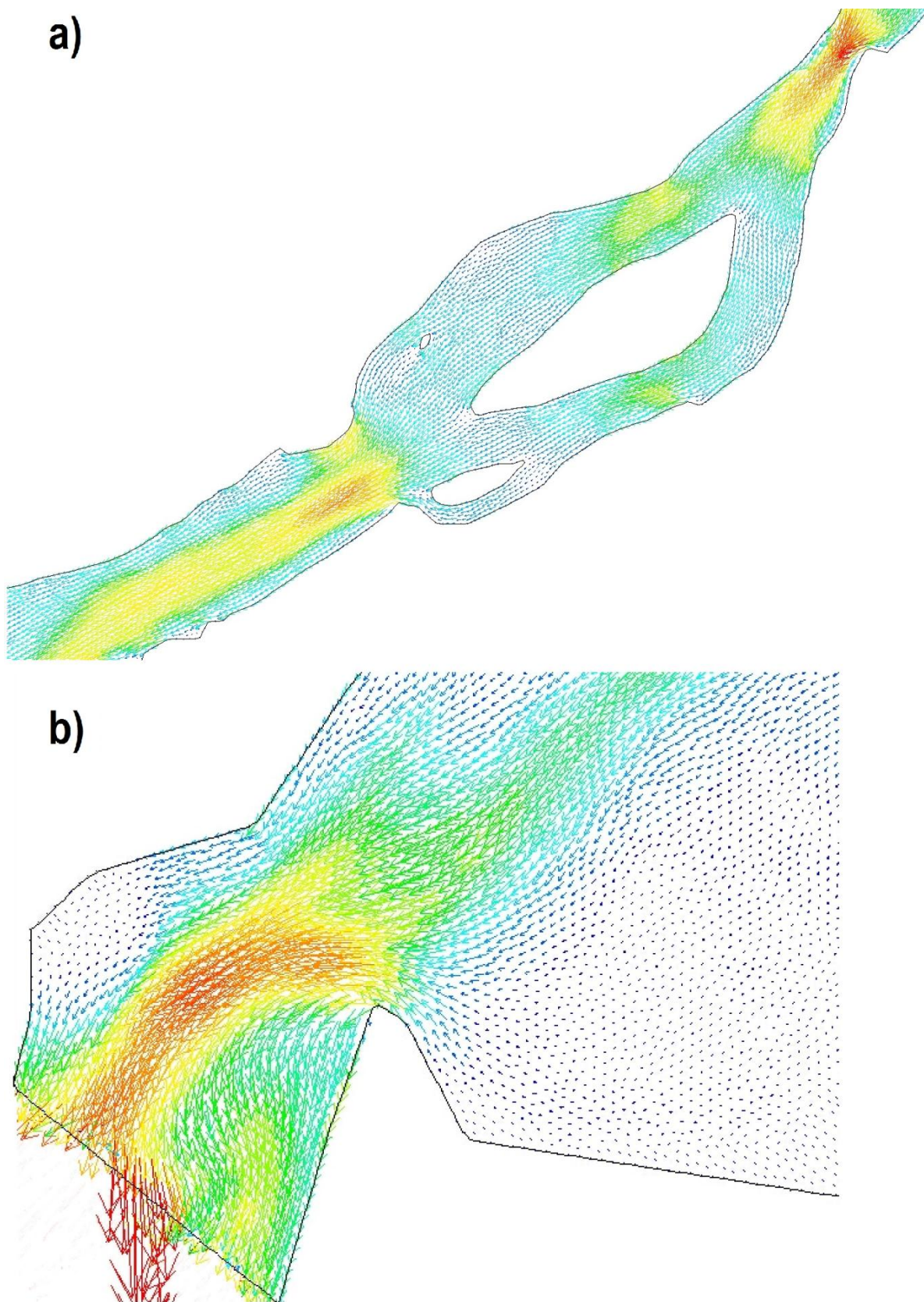


Fig.94 – Pormenor do transporte de sedimentos durante a vazante na: a) ilha da Boega; b) embocadura do estuário – 537120 segundos.